

Robottiaavusteinen työympäristöjen ilman laadun mittausjärjestelmä (RASEM)

LOPPURAPORTTI TSR-HANKKEESTA 118114



Anneli Kangas
Mikko Poikkimäki
Matti Leikas
Tuula Liukkonen

Robottiaivusteinen työympäristöjen ilman laadun mittausjärjestelmä (RASEM)

LOPPURAPORTTI TSR-HANKKEESTA 118114

Anneli Kangas

Mikko Poikkimäki

Matti Leikas

Tuula Liukkonen

Työterveyslaitos

Julkaisu saatavana <https://www.julkari.fi/>

PL 40
00251 Helsinki

www.ttl.fi

© 2023 Työterveyslaitos ja kirjoittajat

Hanke on toteutettu Työsuojelurahaston tuella.

Tämän teoksen osittainenkin kopiointi on tekijänoikeuslain (404/61, siihen myöhemmin tehtyine muutoksineen) mukaisesti kielletty ilman asianmukaista lupaa.

ISBN 978-952-391-090-4 (pdf)

Esipuhe ja kiitokset

Robottiaivusteinen työympäristöjen ilmanlaadun mittausjärjestelmä (RASEM) -tutkimus oli Safëra-yhteistyöprojekti, jossa päävastuullisena tutkijatahona toimi Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) Saksasta. Työterveyslaitoksen lisäksi hankkeeseen osallistui Örebron yliopisto Ruotsista. Työterveyslaitoksen osuus hankkeessa oli kehitettävän sensoriverkon ja robottiaivusteisen mittausjärjestelmän vertailu standardoituihin työhygieenisiin mittauksiin sekä sen arviointi, miten kehitettyjä mittausjärjestelmiä voidaan hyödyntää työntekijöiden altistumisen arvioinnissa ja riskien hallintatoimenpiteiden kohdentamisessa. Tässä julkaisussa raportoidaan Työterveyslaitoksen osuus RASEM-projektista, jota rahoitti Työterveyslaitoksen oman rahoituksen lisäksi Työsuojelurahasto.

Suuri kiitos BAM:n Patrick Neumannille ja Nicolas Winklerille kutsusta Safëra-projektiin sekä hyvin sujuneesta, antoisasta yhteistyöstä projektin aikana. Kiitos Timo Tuomelle, Arto Säämäselle ja Henna Veijalaiselle Työterveyslaitoksen osuuden suunnittelusta, kohdeyritysten hankkimisesta ja rahoitushakemuksen laadinnasta. Artolle ja Hennalle kiitokset myös hankkeen toteutukseen osallistumisesta. Kiitokset Tuija Silonsaarelle työhygieenisiin mittauksiin osallistumisesta, Pasi Polvelle näytteenkeräystä helpottavien apuvälineiden 3D-tulostuksesta sekä Työterveyslaitoksen laboratorion henkilökunnalle näytteiden analysoinnista.

Erytiset kiitokset kuuluvat projektin kohdetyöpaikkojen Outokummun Tornion tehtaiden yhdyshenkilölle Paula Jussheikille ja Tallink Silja Oy:n yhdyshenkilölle Johanna Weckströmille sekä kaikille kohdetyöpaikoissa tutkimukseen osallistuneille henkilöille. Kiitokset Työsuojelurahastolle hankkeen rahoittamisesta.

Tiivistelmä

Saferä-yhteistyöprojektissa ”Robottiaivusteinen työympäristöjen ilmanlaadun mittausjärjestelmä (RASEM)” kehitettiin sensoriverkko- ja robottiaivusteista työympäristön seurantajärjestelmää ilmanlaadun ja ilman epäpuhtauksille altistumisen arvioimiseksi teollisissa ja muissa altisteisissa työympäristöissä. Uusia mittausantureita on kehitetty monille aineille, mikä mahdollistaa monipuolisten mittausjärjestelyjen toteuttamisen kohtuullisin kustannuksin.

Työterveyslaitoksen tutkimusosuudessa tavoitteena oli 1) selvittää sensoriverkon ja robottiaivusteisen seurantajärjestelmän hyödyntämismahdollisuuksia teollisissa tai muuten altisteisissa työympäristöissä, 2) saada aikaisempaa parempi kuva tuotannollisten työpaikkojen ilman epäpuhtauksien ajallisesta ja paikallisesta jakaumasta (pitoisuus- ja altistumiskartat), 3) vertailla kehitettyä sensoriverkkoa ja robottiaivusteista mittausjärjestelmää yleisesti käytettyihin työhygieenisiin mittausmenetelmiin sekä 4) selvittää kehitettyjen mittausverkostojen tarkkuutta kuvata altistumistilanteita ja niiden avulla luotujen pitoisuuskarttojen käyttökelpoisuutta torjuntatoimien suunnittelussa.

Projektissa kehitettiin jatkuvatoimiseen kaasu- ja hiukkaspitoisuuden seurantaan tarkoitettu kiinteä ja langaton RASEM-sensoriverkko. Sensoriverkon kehitystyötä ja teknisiä tietoja esitetään tarkemmin hankkeen verkkosivuilla (<https://projects.safera.eu/project/20>) sekä julkaisuissa (Winkler et al. 2019; 2020; 2021a, b; 2022a, b). Tutkimuskohteita oli kolme: laivan autokansi, terästehtaan kuumavalssaamo sekä ferrokromisulattojen lähialueella sijaitsevat toimistorakennukset, joihin aika ajoin kulkeutui tuotantopäästöjen epäpuhtauksia tuloilman mukana ulkoa. Laivalla mitattiin ajoneuvojen pakokaasuista peräisin olevien hiukkasten ja typpidioksidin pitoisuuksia. Kuumavalssaamossa verrattiin sensoriverkon hiukas-, lämpötila- ja kosteustuloksia perinteisillä mittalaitteilla saatuihin tuloksiin. Toimistorakennusten ulkoilmassa ja yhden rakennuksen toimistoissa seurattiin hiilimonoksidipitoisuuden vaihtelua.

Tutkimustulokset antavat viitteitä siitä, että edullisia sensoreita voidaan hyödyntää sensoriverkkojen kokoonpanoissa ja niiden antamaa tietoa käyttää edelleen työpaikkakohtaisten pitoisuuskarttojen laadinnassa. Karttojen avulla voidaan visualisoida ilman epäpuhtauksien tai esim. lämpötilan ajallista ja paikallista vaihtelua. Robottiauton ja dronin avulla pystyttiin täydentämään sensoriverkolla saatua kuvaa epäpuhtauksien ja lämpötilan jakautumisesta tehdashallissa vaaka- ja pystysuunnassa.

Sensoriverkon käyttö pitoisuuskarttojen laadinnassa vaatii jatkokehittämistä sensorien likaantumisen, sovituksen ja kalibroinnin osalta. Likaantuminen nostaa sensorin vasteen pohjatasoa, jota pitää korjata pitkäaikaisissa mittauksissa. Kaasusensoreissa tulosten tulkintaa vaikeuttaa sensorien ristikkäisherkyys useille yhdisteille. Mitattavana altisteena varsinkin pöly on haastava kalibroinnin suhteen. Punnitsemalla määritetyt pölyn massapitoisuudet korreloivat huonosti sensoriverkon tulosten kanssa. Sen sijaan yhteys suoraan osoittavan pölymittalaitteen (Grimm) ja sensoriverkon vasteen välillä löytyi. Optisten mittalaitteiden tulokset soveltuvat muutosten todentamiseen, mutta tuloksia ei voi verrata työhygieenisiin raja-arvoihin, jotka on annettu hengittävälle pölylle tai pölyn alveolijakeelle. Riittävän tarkka pölyn kokoluokan puuttuminen vaikeuttaa hankkeessa tuotettujen pitoisuuskarttojen hyödyntämistä työntekijöiden altistumisen arvioinnissa. Pölyaltistumisen kannalta merkittävät muutokset voivat myös tapahtua suuremmassa pölyn kokoluokassa, jota sensoreilla ei pystytä toteamaan, sillä ne ovat herkkiä pienemmille hiukkasille. Tulevat sovellukset voisikin kohdentaa juuri pölyn alveolijakeen mittaukseen. Työntekijän sijainnin tarkka paikantaminen on myös tärkeää kiinteiden sensorien muodostamien pitoisuuskarttojen hyödyntämisessä altistumisen arvioinnissa.

Tuotantoprosessien laatu ja ympäristön olosuhteet asettavat myös rajoituksia robottiaivusteisten mittausjärjestelmien käytölle. Uusien mittausmenetelmien, kuten dronien käytön, hyödyntämisessä työympäristöolojen seurannassa tulee ottaa huomioon niiden aiheuttamat turvallisuusnäkökulmat. Sensoriverkolla saadaan valtava määrä mittauksia, joiden käsittely vaatii hyvän suunnitelman ja laskenta-

algoritmin käsittelyä varten. Algoritmin kehitystyö jatkuu edelleen. Samoin sensoriverkkojen tarkka kalibrointi vertailumittaustulosten avulla on vielä kesken. Näin ollen pitkälle meneviä johtopäätöksiä ei voida tehdä nyt raportoitujen tulosten perusteella. Tutkimusta on kuitenkin tärkeä jatkaa, jotta saadaan kehitettyä työpaikoille käyttökelpoinen ja tarkempi menetelmä epäpuhtauspitoisuuksien ja työntekijöiden altistumisen pitkäaikaiseen seurantaan.

Abstract

The research project "Robot-Assisted Environmental Monitoring for Air Quality Assessment (RASEM)" was conducted in collaboration between Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Germany, Finnish Institute of Occupational Health (FIOH), and Örebro University, Sweden. RASEM project was a part of the Safëra 2018 joint call: new technologies, new trends and monitoring safety performance. The project was funded by the Finnish Work Environment Fund, FIOH and BAM.

In industrial environments, airborne by-products such as dusts and toxic gases, can cause a risk to workers' health. It is important to measure the concentration of these air impurities and to detect the temporal fluctuation in the concentrations. For practical and economic reasons, high-quality, costly measurements are often available only for short time-intervals. During recent years, measuring sensors have been developed for many substances, which makes it possible to implement a wide range of measurement systems at a reasonable cost. In the RASEM project, fixed and wireless sensor networks for continuous monitoring of gas and particle concentrations was developed. The development process and technical information are presented in more detail on the project website (<https://projects.safera.eu/project/20>), and in the publications (Winkler et al. 2019; 2020; 2021a, b; 2022a, b).

The aims of FIOH's part of the project were 1) to investigate the possibilities of utilizing the sensor network and robot-assisted monitoring system in industrial work environments, 2) to obtain a better picture of the temporal and spatial distribution of air impurities in production workplaces (concentration and exposure maps), 3) to compare the developed sensor network and robot-assisted measurement system with commonly used occupational hygiene measurement methods, and 4) to investigate the accuracy of the developed measurement network to describe workers' exposure, and the usefulness of the concentration maps in the planning of control measures.

The sensor network was set up and tested in three different work environments: a ship's car deck, a steel mill's hot rolling mill, and an nearby area of the ferrochromium mill where the production emissions can occasionally contaminate the supply air of office buildings. The concentrations of particulate matter and nitrogen dioxide from exhaust gases were measured on board. In the hot rolling mill, the dust concentration, temperature and humidity data of the sensor network were compared with the data obtained by the traditional occupational hygiene measurements. In the outdoor air and in the office rooms, fluctuations in carbon monoxide concentrations were monitored.

The results suggest that low-cost sensors can be used in the sensor network configurations, and the information they provide can be used in the preparation of workplace-specific concentration maps. The maps can be used to visualize the levels of air impurities, or e.g., temporal and local variations of temperature. With the help of a robot car and a drone, it was possible to supplement horizontally and vertically the picture of the distribution of impurities and temperature in the hot rolling mill.

The use of the sensor network for the preparation of concentration maps requires further development, especially regarding calibration and sensor contamination. The contamination raises the response level of the sensors, which needs to be corrected in long-term measurements. For gas sensors, the interpretation of the results is complicated due to the cross-sensitivity of the sensors to several compounds. Dust is particularly challenging agent in the terms of sensor calibration. The mass concentrations of dust were poorly correlated with the results of the sensor network, but instead, a correlation was found between the dust measuring device (Grimm) and the sensor network responses. The results of optical measuring devices are suitable for verifying changes, but the results cannot be compared with the occupational limit values that are given for the inhalable or respirable dust fractions. The lack of a sufficiently precise dust size range makes it difficult to

use the concentration maps for the assessment of workers' exposure. Accurate determination of workers' location is also important for the use of concentration maps in exposure assessment.

The type of production processes and environmental conditions also impose restrictions on the use of robot-assisted measurement systems. When using new measurement techniques, such as drones for monitoring work environment conditions, the safety aspects related to their use must be considered. The sensor network provides a huge number of measurement results, which requires a good plan and calculation algorithm for processing. The development of the algorithm is still ongoing, likewise the accurate calibration of the sensor network using reference measurement results. Therefore, far-reaching conclusions cannot be drawn based on these results, but it is important to continue research for developing more practical and accurate methods for long-term monitoring of air impurities and workers' exposure.

Sisällys

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Esipuhe ja kiitokset | 4 |
| Tiivistelmä..... | 5 |
| Abstract | 7 |
| Sisällys..... | 9 |
| 1 Tausta..... | 10 |
| 2 Tavoitteet..... | 11 |
| 3 Tutkimuskohteet ja menetelmät | 12 |
| 3.1 Tutkimuskohteet..... | 12 |
| 3.2 Sensoriverkot | 13 |
| 3.3 Työhygieeniset mittaukset..... | 13 |
| 3.4 Liikkuvat mittausyksiköt..... | 15 |
| 4 Tulokset..... | 16 |
| 4.1 Sensoriverkon ja vertailumittausten tulokset..... | 16 |
| 4.1.1 Laivan autokansi | 16 |
| 4.1.2 Terästehtaan kuumavalssaushalli..... | 18 |
| 4.1.3 Terästehtaan toimistorakennukset..... | 20 |
| 4.2 Sensoriverkkoalueen pitoisuus- ja lämpötilakartat..... | 21 |
| 4.2.1 Laivan autokansi – kaasupitoisuuskartta..... | 22 |
| 4.2.2 Terästehtaan kuumavalssaushalli – pölypitoisuus- ja lämpötilakartat..... | 22 |
| 4.3 Liikkuvat mittausyksiköt – drooni ja robottiauto..... | 24 |
| 4.4 Työntekijäkohtaisten altistumismittausten ja sensoriverkon tulosten vertailu..... | 24 |
| 5 Pohdinta..... | 27 |
| 6 Johtopäätökset ja jatkotutkimustarpeet | 29 |
| 7 Tulosten hyödyntäminen..... | 30 |
| Lähteet..... | 31 |

1 Tausta

Tuotannollisissa työympäristöissä ilmassa olevat epäpuhtaudet, kuten erilaiset pölyt sekä haitalliset höyryt ja kaasut muodostavat riskin työntekijöiden terveydelle. Käytännöllisistä ja taloudellisista syistä työntekijöiden altistumisen arvioimiseksi tehtävät työhygieeniset mittaukset kattavat useimmiten ainoastaan yhden työpäivän tai työvuoron. Ilman epäpuhtauksien pitoisuusmittauksissa käytetään yleisesti keräviä menetelmiä eli näytteitä kerätään ilmasta pumppujen avulla työntekijöiden hengitysvyöhykkeiltä ja kiinteistä pisteissä suodattimille tai muille keräimille, joista pitoisuudet määritetään laboratoriossa. Lisäksi voidaan käyttää tallentavia mittareita pitoisuusvaihtelun selville saamiseksi.

Työpaikoilla ilman epäpuhtauspitoisuudet ja työntekijöiden altistuminen vaihtelevat päivittäin mm. prosessista ja työn luonteesta, tuotekirjosta, työstettävien materiaalien laadusta, vuodenajasta, sääoloista ja ilmanvaihdon tilasta johtuen. Näin ollen yhden päivän aikana tehtävä työhygieeninen selvitys ei välttämättä anna riittävää kuvaa pidempiaikaisesta altistumistilanteesta. Nykyinen kemiallistyöhygieenisten mittausten standardi SFS-EN 689:2018 + AC:2019 edellyttää useampia mittauksia ja edellä mainittujen, pitoisuuksiin vaikuttavien tekijöiden huomioon ottamista luotettavan kuvan saamiseksi pitoisuustasosta ja työntekijöiden altistumisesta.

Tässä tutkimushankkeessa kehitettiin kustannustehokasta sensoriverkkoa ja robottivusteista työympäristön seurantajärjestelmää yleisen ilmanlaadun selvittämiseksi sekä ilman epäpuhtauksille altistumisen arvioinnin tueksi teollisissa tai muuten altisteisissa työympäristöissä. Uusia, edullisia mittausantureita on kehitetty monille aineille ja tämä mahdollisti pitkäaikaisten mittausjärjestelyjen toteuttamisen kohtuullisin kustannuksin. Tavoitteena oli saada kehitettävän mittausjärjestelmän avulla parempi kuva teollisten työpaikkojen ilman epäpuhtauksien ajallisesta ja paikallisesta jakaumasta sekä vaihtelusta pitkällä aikavälillä, esim. vuoden aikana. Pitoisuusjakaumien havainnolliseen kuvaamiseen luotiin pitoisuus- ja altistumiskarttoja.

Työterveyslaitoksen osuus tutkimuksesta oli testata kehitettyä sensoriverkkoa ja mittausrobotteja työpaikoilla ja arvioida niiden soveltuvuutta erilaisiin työympäristöihin. Työpaikoilla vertailtiin kehitettyjä menetelmiä perinteisiin työhygieenisiin mittausmenetelmiin. Arvioitiin myös kehitettyjen menetelmien soveltuvuutta työntekijöiden altistumisen arviointiin ja riskien hallintatoimien kohdentamiseen.

2 Tavoitteet

Työterveyslaitoksen tutkimusosuudessa tavoitteet olivat:

- Selvittää sensoriverkon ja robottivusteisen seurantajärjestelmän hyödyntämismahdollisuuksia teollisissa tai muuten altisteisissa työympäristöissä.
- Saada aikaisempaa parempi kuva tuotannollisten työpaikkojen ilman epäpuhtauksien ajallisesta ja paikallisesta jakaumasta (pitoisuus- ja altistumiskartat).
- Vertailla kehitettyä sensoriverkkoa ja robottivusteista mittausjärjestelmää yleisesti käytettyihin työhygieenisiin mittausmenetelmiin.
- Selvittää kehitettyjen mittausverkostojen tarkkuutta kuvata altistumistilanteita ja niiden avulla luotujen pitoisuuskarttojen käyttökelpoisuutta torjuntatoimien suunnittelussa.

3 Tutkimuskohteet ja menetelmät

3.1 Tutkimuskohteet

Tutkimuksen kohteet valikoituivat perusteellisuuteen ja merenkulkuun. Sensoriverkko asennettiin kolmeen erilaiseen työympäristöön erilaisten altistumisolosuhteiden selvittämiseksi. Kaikissa kohteissa epäpuhtauspäästöt liittyivät selvästi prosessin tai päästöä aiheuttavan tapahtuman toistuvaan vaiheeseen. Kahdessa tutkimuskohteessa epäpuhtauden primäärilähde sijaitsi sisätiloissa. Näissä kohteissa työntekijät työskentelivät työpäivän aikana alueella, jonne sensoriverkko asennettiin. Yhdessä tutkimuskohteessa sensoriverkko asennettiin ulkoilmaan toimisto- ja tuotantorakennusten ulkopuolelle ilmanottoaukkojen läheisyyteen. Tässä kohteessa tavoitteena oli selvittää epäpuhtauden leviämistä toimistorakennuksiin ilmavaihdon välityksellä.

Tutkimuskohteena 1 oli laiva, jossa sensoriverkko asennettiin autokannelle 8.9.2021–24.5.2022 väliseksi ajaksi. Sensoriverkossa oli yhdeksäntoista tiedonkeruuyksikköä, jotka mittasivat kuormauskoneiden, henkilöautojen ja rekkojen pakokaasuista ja liikkumisesta vapautuvien hiukkasten ja typpidioksidin pitoisuutta, katso kuva 1. Tiedonkeruuyksikköjen korkeudet lattiatasosta vaihtelivat 2,1 m–2,5 m. Tiedonkeruuyksikköjen akut vaihdettiin kolmen viikon välein. Sensoreita ei puhdistettu mittausjaksolla. Kohteessa tehtiin vertailumittauksia työhygieenisillä mittausmenetelmillä vuonna 2021 kahdesti. Yksi vertailumittausjakso oli kestoltaan kolme päivää. Ensimmäiset vertailumittaukset työhygieenisillä mittalaitteilla tehtiin tutkimuskohteessa 1 noin kuusi viikkoa sensoriverkon asennuksen jälkeen.



Kuva 1a. RASEM sensori ja vertailumittauslaitteisto.



b. Pylvääseen kiinnitetty RASEM sensori.

Tutkimuskohteena 2 oli terästehdas, jossa sensoriverkko asennettiin kuumavalssaushalliin 13.4.2021–29.11.2022 väliseksi ajaksi. Sensoriverkko muodostui 16 tiedonkeruuyksiköstä, joilla seurattiin prosessista vapautuvien hiukkasten ja hiilimonoksidin pitoisuutta. Lähimmät sensorit olivat tuotantolinjaan nähden noin 5 m ja kauimmat noin 15 m etäisyydellä. Korkeudet lattiatasosta vaihtelivat 1,5 m–3,4 m. Sensorit puhdistettiin mittausjaksolla kaksi kertaa. Kohteessa tehtiin neljä vertailumittauksia. Mittaukset olivat kestoltaan 1–7 päivää ja ajoittuivat vuosille 2021–2022. Tutkimuskohteessa 2 ensimmäiset vertailumittaukset tehtiin noin neljä viikkoa sensoriverkon asentamisen jälkeen.

Tutkimuskohteessa 3 sensoriverkko asennettiin ulkoilmaan ferrokromisulattojen lähialueella sijaitsevien toimistorakennusten katolle kahdeksi aikajaksoksi, välille 11.5.2021–8.11.2021 ja 2.6.2022–22.9.2022, ajoittuen keväälle, kesälle ja syksyille. Kahdeksan tiedonkeruuyksikköä muodostivat sensoriverkon, joilla seurattiin hiukkasten ja hiilimonoksidin pitoisuutta ulkoilmassa sekä tarkasteltiin hiilimonoksidin mahdollista leviämistä

tuotannosta toimistorakennuksiin. Yksikköjen korkeudet maatasosta vaihtelivat 2–11 m. Mittausjaksojen välissä sensorit huollettiin kerran. Vertailumittaukset toteutettiin samanaikaisesti toimistorakennusten sisältä, joilla tarkasteltiin hiilimonoksidin kulkeutumista ulkoilmasta toimistojen sisäilmaan.

3.2 Sensoriverkot

Projektissa kehitettiin jatkuvatoimiseen kaasu- ja hiukkaspitoisuuden seurantaan tarkoitettu kiinteä ja langaton RASEM-sensoriverkko. Sensoriverkon kehitystyötä ja teknisiä tietoja esitetään tarkemmin hankkeen verkkosivuilla (Safëra) sekä julkaisuissa (Winkler et al. 2019; 2020; 2021a, b; 2022a, b). Kaikissa aiemmin mainituissa tutkimuskohteissa käytettiin samankaltaisia hinnaltaan edullisia sensoreita hieman eri kokoonpanoilla. Sensoreilta saatu data on sovittamaton, suora jännitesuure suhteessa mittaussuureeseen (arbitrary unit). Sensoreille ei ole tehty yksilöllisiä sovituksia tai kalibrointeja vaan esimerkiksi sensoridatan pohjatasot pitää sovittaa ennen kuin tuloksia voidaan mielekkäästi käyttää. Tiedonkeruuyksiköiden virtalähteenä oli joko verkkovirtalähde tai akku. Ulkoilmamittauksissa tutkimuskohteessa 3 virtalähde oli varustettu aurinkopaneelilla.

Kuumavalssaushallissa ja ulkoilmamittauksissa sensoriverkon yksittäiset tiedonkeruuyksiköt kytkettiin langattomaan WiFi-lähiverkkoon, josta mittaus tieto siirrettiin päivittäin Raspberry Pi-palvelimelle ja edelleen internetin välityksellä tutkijoiden käyttöön. Laivan autokannella mittausdata tallentui palvelinyksikön muistikorttiin. Muistikortti tyhjennettiin manuaalisesti aika ajoin. Sensorien tuottamat mittaussignaalit käsiteltiin tutkimuskumppanin (BAM) toimesta hankkeessa kehitetyillä laskenta-algoritmeilla pitoisuuskuvaajiksi ja edelleen pitoisuuskartoiksi.

Laivan autokannella (tutkimuskohde 1) tiedonkeruuyksikkö oli varustettu optisella hiukkassensorilla Dust Sensor Sharp GP2Y1010AU0F (Waveshare) ja typpidioksidisensorilla DGS-NO2 968-043. Yhdeksäntoista tiedonkeruuyksikköä muodosti sensoriverkon. Optisen hiukkassensorin mittausalue oli sensorin valmistajan mukaan $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$, toteamisraja $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja operointilämpötila -10°C – 65°C . Digitaalisen kaasusensorin mittausalue oli 0–5 ppm ja mittaustarkkuus $\pm 15\%$. Sensorin operointilämpötila on -20 – $+40^\circ\text{C}$. Sensori on ristikkäisherkkä usealle kaasulle, kuten typpidioksidille, rikkivedylle, otsonille, typpioksidille, rikkidioksidille ja hiilimonoksidille.

Kuumavalssaamossa (tutkimuskohde 2) tiedonkeruuyksikkö oli varustettu optisella hiukkassensorilla Dust Sensor Sharp GP2Y1010AU0F (Waveshare), sähkökemiallisella kaasusensorilla SPEC DGS Indoor Air Quality DGS-IAQ 968-040 (Spec Sensors) sekä lämpötila- ja kosteussensorilla (AM2303 ja DHT22). Sensorin valmistajan ilmoittama optisen hiukkassensorin mittausalue oli $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$, toteamisraja $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja operointilämpötila -10°C – 65°C . Digitaalisen kaasusensorin mittausalue oli 0–1000 ppm ja mittaustarkkuus $\pm 15\%$. Sensori oli ristikkäisherkkä mm. hiilimonoksidille, rikkivedylle, rikkidioksidille, typpidioksidille ja typpioksidille sekä CO-ekvivalentti alueella 0–400 ppm. Sensorin operointilämpötila on -20 – $+40^\circ\text{C}$. Lämpötilasensorille annettu toiminta-alue oli -40 – $+80^\circ\text{C}$ ja tarkkuus $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Vastaavat arvot suhteelliselle kosteudelle olivat 0–100 %, tarkkuus $\pm 2\%$.

Ferrokromisulattojen lähialueiden ulkoilmassa (tutkimuskohde 3) tiedonkeruuyksikkö oli varustettu samalla optisella hiukkassensorilla ja hiilimonoksidisensorilla kuin kuumavalssaamossa. Kahdeksan tiedonkeruuyksikköä muodosti sensoriverkon.

3.3 Työhygieeniset mittaukset

Sensoriverkon kehitystyöhön kuului sen soveltuvuuden tarkastelu altistumisen arviointiin. Tästä syystä tutkimukseen osallistuvissa kohdeyrityksissä tehtiin mittauksia perinteisillä keräävillä ja suoraan osoittavilla

työhygieenisillä mittalaitteilla sekä työntekijöiden hengitysvyöhykkeeltä että kiinteistä mittauspisteistä sensoriverkon tiedonkeruuyksiköiden vierestä. Käytetyt mittalaitteet (Taulukko 1) oli kalibroitu niiden säännöllisen kalibroitiohjelman mukaisesti. Kuumavalssaushallissa työhygieenisia mittauksia tehtiin suoraan osoittavilla ja keräävillä mittausmenetelmillä tiedonkeruuyksiköiden lähelle asennetuissa mittauspisteissä noin kaksi viikkoa verkon asennuksen jälkeen sekä lisäksi kolmen työhygieenisen mittauskampanjan aikana. Laivan autokannella työhygieeniset mittaukset toteutettiin kahden mittauskampanjan aikana. Lisäksi toimistorakennuksiin asennettiin suoraan osoittavat mittalaitteet pitkäaikaisvertailua varten.

Taulukko 1. Työhygieeniset mittalaitteet ja keräävät menetelmät.

| Suoraan osoittavat mittalaitteet | | |
|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| Altiste | Menetelmä | Tutkimuskohde |
| Pölyn jakeet, hengittyvä ja alveolijae ja PM ₁₀ | Grimm 1.108, 1.109 ja 11C, valon sironta | Laivan autokansi, Kuumavalssaushalli |
| Pölyn jakeet PM ₁₀ | TSI Sidepak AM 510, valon sironta | Laivan autokansi, Kuumavalssaushalli |
| Pölyn jakeet (6 nm – 10 µm) | ELPI+, sähköinen alipaineimpaktori | Kuumavalssaushalli |
| Hiilimonoksidi | Deltaohm HD21AB ja VelociCalc/Q-Trak 7575, sähkökemiallinen | Toimistorakennukset |
| Hiilimonoksidi, lämpötila, suhteellinen kosteus | Fluke 975 | Laivan autokansi |
| Typen oksidit | Environnement SA 32M | Laivan autokansi |
| Typen oksidit | Dräger Xam 5600, sähkökemiallinen | Laivan autokansi |
| Keräävät menetelmät | | |
| Altiste | Menetelmä | Tutkimuskohde |
| Alveolijakeinen pöly | sykloni, selluloosa-asetaattisuodatin, gravimetria | Laivan autokansi, Kuumavalssaushalli |
| Hengittyvä pöly | selluloosa-asetaattisuodatin (IOM), gravimetria | Laivan autokansi, Kuumavalssaushalli |
| Dieselnoki | sykloni, kvartsikuitusuodatin, alkuainehiilen määrittäminen | Laivan autokansi |
| Typpidioksidi | NO ₂ TEA-IMS-putki SKC-226-40-02, ionikromatografia | Laivan autokansi |
| Kromi, kromi(VI), nikkeli | selluloosa-asetaattisuodatin (IOM), ICP-MS tekniikka | Kuumavalssaushalli |
| Nikkeli, alveolijae | sykloni, kolmiosainen millipore keräin, kalvosuodatin, ICP-MS tekniikka | Kuumavalssaushalli |

Työterveyslaitoksen Laboratoriotointoiminta on akkreditoitu testauslaboratorio T013 (FINAS-akkreditointipalvelut, EN ISO/IEC 17025). Näytteenkeräys- ja analyysimenetelmistä hengittyvä ja alveolijakeinen pöly ja metallit ovat akkreditoituja. Dieselnokianalyysi, typpidioksidi ja suoraan osoittavat menetelmät eivät kuulu akkreditoinnin piiriin. Työterveyslaitoksen tekemien työhygieenisten mittausten pohjana ovat standardit SFS-EN 689:2018+AC:2019:en, SFS-EN 481:1994 ja SFS-EN 482:2015+A1:2015:en.

Mittauksia tehtiin myös työntekijöiden hengitysvyöhykkeeltä työntekijän altistumisen selvittämiseksi. Vertailumittaukset toteutettiin standardin SFS-EN 689:2018+AC:2019:en mittausstrategian mukaisesti. Tutkitut työtehtävät oli valittu siten, että työntekijöiden työtehtäviin kuuluu työskentelyä hankkeessa tuotetun sektoriverkon alueella. Työntekijöitä pyydettiin kirjaamaan työtapahtumat. Työtapahtuman sijainnin selvittämisessä apuna käytettiin työympäristön pohjakuvaa. Työkirjaus oli mahdollista tehdä paperiseen lomakkeeseen tai puhelimen avulla sähköiselle Forms-lomakkeelle. Lisäksi työntekijöitä haastateltiin mittauspäivän jälkeen. Työkirjausta hyödynnettiin erityisesti kuumavalssaushallin tutkimuskohteessa, sillä työn havainnoiminen ei ollut mahdollista tutkittavien henkilöiden työtehtävistä johtuen.

3.4 Liikkuvat mittausyksiköt

Kiinteän sensoriverkon tuottamaa mittausdataa täydennettiin liikkuvilla mittausyksiköillä (kuva 2) kuumavalssaushallissa (tutkimuskohde 2). Muissa tutkimuskohteissa liikkuvien mittausyksiköiden hyödyntäminen kiinteän sensoriverkon tuloksen täydentämiseksi ei ollut mahdollista tilan ahtaudesta, seinien heijastuspintoista sekä muista kohteesta liikkuvista yksiköistä johtuen. Liikkuvia mittausyksiköitä käytettiin täydentämään kiinteällä sensoriverkolla saatuja tuloksia mittaamalla tiedonkeruuyksikköjen väliin jääneillä alueilla. Vertikaalista pitoisuusvaihtelua seurattiin droonilla ja horisontaalista robottiautolla. Drooni oli varustettu Alphasense OPC-R1-hiukkassensorilla sekä lämpötila- ja korkeussensoreilla. Maarobotti varustettiin valon sirontaan perustuvilla pölymittalaitteilla (Grimm 1.108, 11C, TSI SidePak AM 510). Maarobottiin asennettiin myös mittalaitteet hengittävän pölyjakeen ja alveolijakeen gravimetrista analyysiä varten (kts. 3.3 Työhygieeniset mittaukset).



Kuva 2. Mittauksissa käytetyt kiinteä tiedonkeruuyksikkö sekä liikkuvat mittausyksiköt: drooni ja maarobotti.

4 Tulokset

4.1 Sensoriverkon ja vertailumittausten tulokset

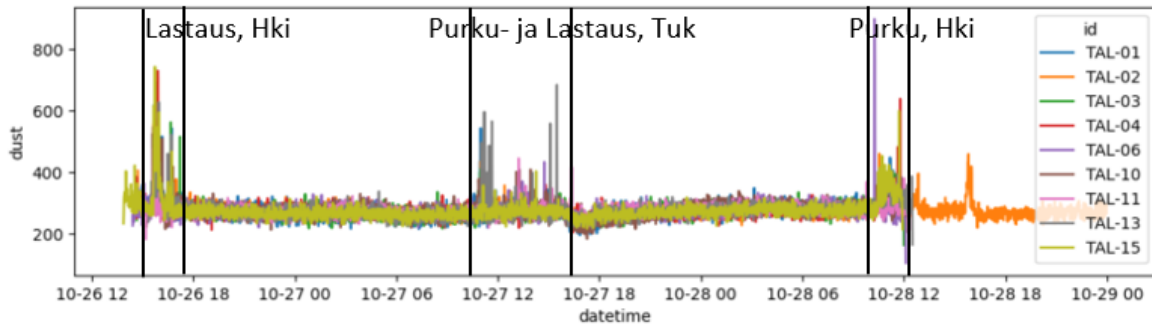
Sensoriverkoilla mitattiin kolmessa olosuhteiltaan hyvin erilaisessa tutkimuskohteessa, laivan autokannella, kuumavalssaushallissa ja ferrokromisulattojen ympäristössä ulkoilmassa. Laivan autokannella ilman epäpuhtauksia tuottivat kaksi kertaa päivässä toistuvat lastaus- ja purkutapahtumat, jolloin autokannella ajoivat dieselpäätteiset kuormauskoneet, trukit sekä rekka- ja muu autoliikenne. Kuumavalssaushallissa pölyä tuotti jatkuva hehkuvan kuumien teräsaihioiden työstö. Kun taas ferrokromisulatoilta päätyi satunnaisesti ulkoilmaan prosessissa syntyvää hiilimonoksidikaasua, jonka leviäminen läheisiin toimistorakennuksiin tuulen ja ilmavirtausten mukana oli kiinnostuksen kohteena.

Laivan autokannella ja kuumavalssaushallissa tarkasteltiin ilmaan prosessista päätyvää pölyä. Pölyhiukkaset erosivat mm. kemiallisen koostumuksen, hiukkaskoon ja määrän suhteen. Muun muassa työhygienisellä keräävällä vertailumittauslaitteistolla määritetyt pölypitoisuudet ja vaihtelu olivat suuremmat kuumavalssaamossa sekä hengittyvän ($<0,1-8,2 \text{ mg/m}^3$, $n=53$) että pölyn alveolijakeen ($<0,001-0,7 \text{ mg/m}^3$, $n=52$) osalta kuin laivan autokannella (hengittyvä $0,1-0,3 \text{ mg/m}^3$, $n=15$ ja alveoli $0,06-0,08 \text{ mg/m}^3$, $n=9$). Eri mittauskampanjoiden välillä havaittiin molemmissa mittauskohteissa pölypitoisuudessa ajallisia eroja, jotka selittyivät tutkimuskohteessa vallinneella olosuhteella, kuten katupölyllä tai lattian puutteellisella siivouksella.

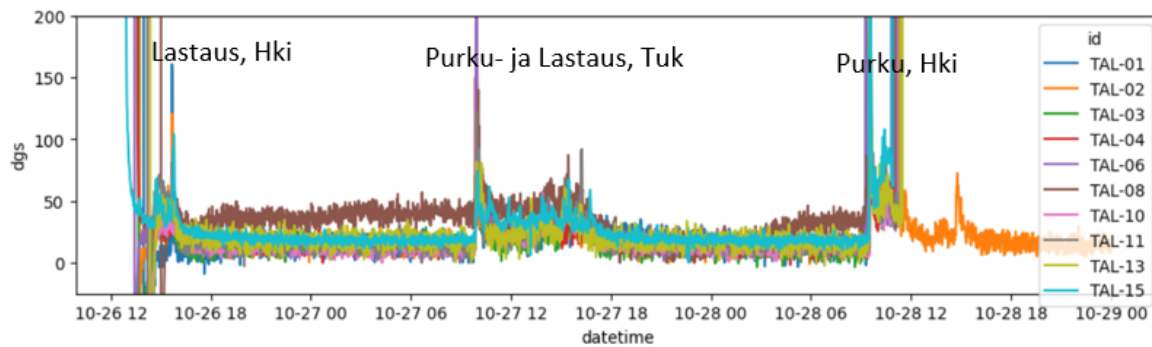
Sensoriverkkojen avulla havaittiin yhteys hiukkasmaisia epäpuhtauksia vapauttavan tapahtuman, kuten kuormauskoneiden käytön tai teräsaihion työstön, ja sensorilla esiintyneen hiukkaspitoisuuden välillä. Lisäksi havaittiin suuria eroja pölysensoreiden pohjatasoissa (nollapitoisuuden vaste) ja pohjatason nousua pitemmän ajan kuluessa johtuen sensorin optiikan likaantumisesta. Sensorien nollatasoissa oli suuret vaihtelut myös valmistajien tuoteparametrien mukaan eikä sensoreita sovitettu yksilöllisesti ennen mittausta. Nollatasot piti siis yhtenäistää ennen tulosten arviointia. Tulosten tarkastelussa merkityksellistä on seurata sensoreiden keskinäisiä eroja tietyllä ajan hetkellä sekä huomioida mittausvasteen muutos ajan suhteen.

4.1.1 Laivan autokansi

Laivan autokannelle asennettiin sensoriverkko, johon kuului tiedonkeruuyksiköt TAL-1–13 ja TAL-15–20. Autokannella havaittiin aistinvaraisesti sekä mittalaitteilla autoliikenteeseen ja ahtaukseen liittyviä tapahtumia, joissa vapautui dieselpakokaasuja. Tuloksissa havaittiin hiukkaspitoisuuden nousua erityisesti puoliperäkonttien lastaus- ja purkuvaiheissa verrattuna rekkojen ja henkilöautojen lastaukseen. Sensoriverkon mittaamat pitoisuusvaihtelut olivat suurempia Helsingin satamassa verrattuna Tukholman satamaan, katso kuva 3. Samat johtopäätökset voidaan tehdä myös työhygienisten vertailumittausten perusteella. Tämä johtuu mahdollisesti satamissa käytetyistä erimallisista kuormauskoneista.

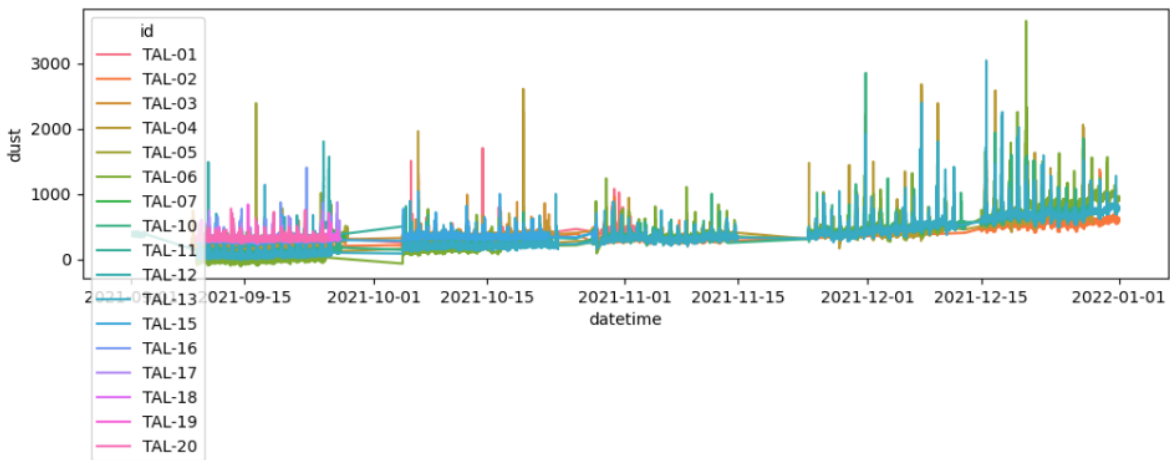


Kuva 3. Sensoriverkolla mitattu hiukkaspitoisuuden vaihtelu laivan autokannella 26.-28.10.2021. Kuvaajista erottuu autokannen lastaus- ja purkutapahtumat Helsingissä (Hki) ja Tukholmassa (Tuk) suurempina mittausvasteina verrattuna sensorien pohjatasoon. Ajankohta on esitetty muodossa kuukausipäivä kellonaika.



Kuva 4. Sensoriverkolla mitattu kaasupitoisuuden vaihtelu laivan autokannella 26.-28.10.2021.

Kuva 4 osoittaa, että lastin purku aiheutti suurempia kaasumaisia päästöjä verrattuna lastaukseen, sillä ajoneuvojen kylmät moottorit tuottavat suurempia epäpuhtauspäästöjä. Tämä havaittiin myös typen oksidien mittauksissa työhygieenisillä mittalaitteilla.



Kuva 5. Pölysensorien pohjatason havaittiin nousevan laivan autokannella 15.9.-31.12.2021.

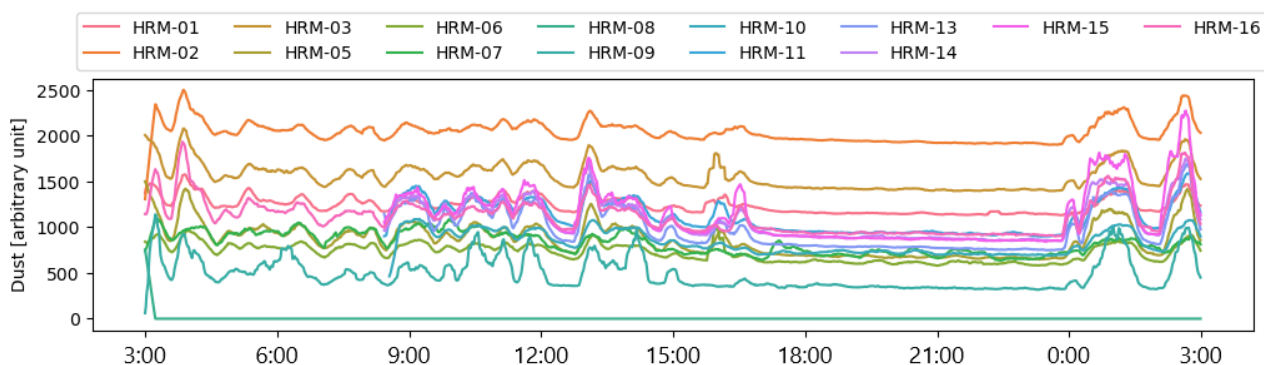
Pidempiaikaisessa 3,5 kuukauden mittauksissa havaittiin sensoriverkon optiikan likaantumisesta aiheutuvaa pohjatason nousua, mikä nähdään nousevana trendinä kuvassa 5. Sensoriverkon pohjatason

noususta riippumatta havaittiin sen avulla suuremmat pölypitoisuudet vertailumittauskampanjan aikana 13.-15.12.2021, mikä oli linjassa vertailumittauslaitteiston tulosten kanssa. Pitoisuuden nousun todettiin johtuvan autokannelle kertyneestä katupölystä.

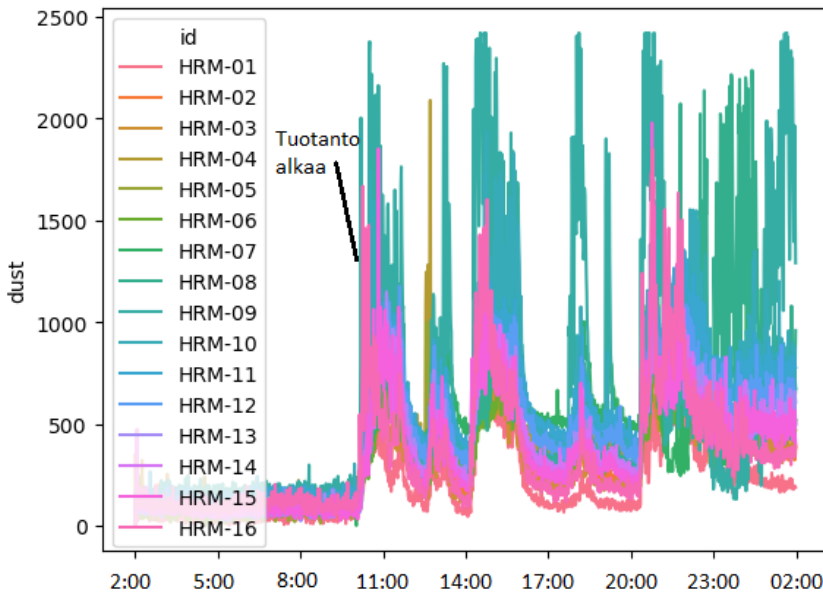
4.1.2 Terästehtaan kuumavalssaushalli

Tutkimushankkeen toiseen kohteeseen kuumavalssaamolle asennettiin 16 tiedonkeruuyksikköä sisältävä sensoriverkko (HRM-01–16), jonka avulla selvitettiin teräsaihioiden valssauksesta työilmaan vapautuvien epäpuhtauksien pitoisuuksia. Sensoriverkolla havaittiin tuotannosta riippuvaista mittausvasteen vaihtelua. Eroja havaittiin kaikissa mitatuissa suureissa (pöly, kaasu, lämpötila ja suhteellinen kosteus). Tuotantokatkot nähtiin mm. pöly- sekä lämpötilasensorilla mittausvasteen laskuna. Vastaavat havainnot tehtiin myös työhygieenisillä vertausmittauksilla: tuotantokatkojen aikaiset pöly- ja metallipitoisuudet olivat 17–68 % tuotannon aikaisista pitoisuuksista.

Sensoriverkon mittaus tuloksissa, kuva 6, voidaan havaita pölyn mittausvasteen vaihtelua, joka tasoittuu n. klo 17–23 tuotannon keskeytyessä. Sensorilla HRM-02 (oranssi) havaitaan korkein mittausvaste. Perinteisissä työhygieenisissä mittauksissa ei havaittu vastaavaa pitoisuuden nousua, joten voidaan päätellä suuren mittausvasteen johtuvan sensorin korkeasta, kompensoimattomasta pohjatasosta (nollapitoisuuden vaste). Siten pölysensorien pohjatasojen erot täytyy laskennallisesti korjata, jotta eri paikoissa sijainneiden sensoreiden välisiä eroja voidaan mielekkäästi vertailla keskenään. Tällainen pohjatasojen korjaus on tehty kuvassa 7 esitettyihin mittaus tuloksiin, joista havaitaan hyvin pölypitoisuuden paikallinen ja ajallinen vaihtelu.



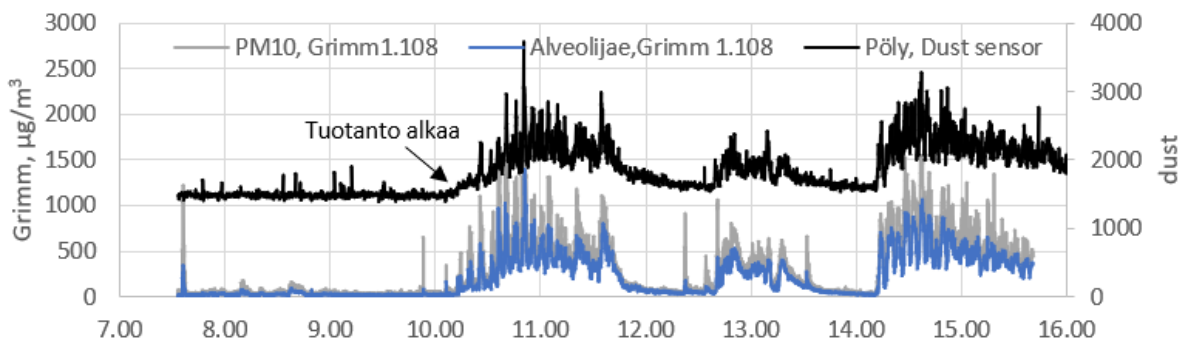
Kuva 6. Pölysensorien mittausvasteen vaihtelu kuumavalssaamossa yhtenä päivänä 23.4.2021.



Kuva 7. Mittauspisteiden väliset erot kuumavalssaamossa 11.11.2021, kun sensorien tulosten pohjataso on korjattu. Suurimmat mittausvasteet havaitaan, kun tuotanto on käynnistynyt.

Sensoriverkon pölysensorien tulos korreloi kohtalaisen hyvin vertailussa käytetyn optisen Grimm-mittalaitteen tulosten kanssa eri hiukkaskokojakeiden osalta ($R^2=0,87-0,94$). Tulosten välinen korrelaatio oli hyvä etenkin alveolijakeelle sekä kokoluokissa PM1 ja PM2.5, joilla tarkoitetaan alle 1 ja 2,5 μm kokoisten pölyhiukkasten massapitoisuutta. Yleisestikin on tiedossa, että pääsääntöisesti optisesti havaitaan parhaiten juuri nämä pienempien kokoluokkien pölyhiukkaset (Cauda, 2021).

Esimerkkinä kuvassa 8 on esitetty samassa mittauspisteessä sijainneiden pölysensorin ja suoraan osoittavan Grimm-pölymittarin tulosten ajallinen vaihtelu. Huomataan, että sensorin mittausvasteen lyhyen aikavälin vaihtelu korreloi hyvin pölymittarin aikavaihtelun kanssa. Sen sijaan verrattuna keräävään työhygieeniseen mittausmenetelmään, punnittu alveolijakeisen pölyn keskiarvopitoisuus (0,66 mg/m^3 , klo 10:48-15:42) oli 2,2-kertainen optisen Grimm-mittarin pitoisuuteen (0,30 mg/m^3) nähden. Optisten pölysensorien ja Grimm-pölymittarin antamat pitoisuudet kuvaavatkin lähinnä pölypitoisuuden ajallista vaihtelua, eivät raja-arvoihin verrattavia punnittuja pölypitoisuuksia.



Kuva 8. Pölymittalaitteen Grimm ja sensorin HRM-15 mitaama pitoisuusvaihtelu 11.11.2021. Sensorin mittausvaste (musta) korreloi hyvin Grimm-pölymittarilla mitattuun massapitoisuuteen (sininen ja harmaa). PM10 tarkoittaa alle 10 μm kokoisten pölyhiukkasten massapitoisuutta, joka oli yhtenä vertailukohteena sensoriverkolle.

Pölysensorien mittausvasteen korrelaatio punnittuihin massapitoisuuksiin oli yleisestikin huono tässä tutkimuksessa ($R^2=-0,1$), kuten myös kirjallisuudessa on todettu (Sousan et al., 2016; Li ja Biswas, 2017). Sen sijaan Grimm-mittalaitteella havaittiin kohtalaisen hyvä korrelaatio punnitun alveolijakeen osalta ($R^2=0,5-0,7$), mutta ei punnitun hengittyvän pölyn massapitoisuuden osalta ($R^2=0,1$).

Pölyn jaekokoa tutkittiin tarkemmin sähköisellä alipaineimpaktorilla (ELPI+), jolla saatiin tarkkaa tietoa sekä pölyn kokojakaumasta nanometrikoosta mikrometrikokoluokkaan (6 nm–10 µm) että nanokokoisten hiukkasten lukumääräpitoisuudesta. Kuumavalssaamalla pölyhiukkasten lukumääräpitoisuus vaihteli pääosin välillä 100 000–400 000 hiukkasta/cm³. Kirjallisuudessa vastaavissa metalliteollisuuden työympäristöissä on raportoitu nanohiukkasten keskipitoisuuksia, jotka ovat olleet tasolla 10 000–1 000 000 hiukkasta/cm³ ja jopa sen yli (Viitanen et. al. 2017).

Pölyn hiukkaskokojakaumassa havaittiin kolme eri hiukkaspopulaatiota. Ensimmäinen populaatio pääosin nanometrikokoisia hiukkasia (6–100 nm) hallitsi lukumääräpitoisuutta, joka antaa viitteitä tuoreista melko hiljattain prosessissa syntyneistä pölyhiukkasista. Hiukkaset ovat mahdollisesti syntyneet kuumaprosessin seurauksena tiivistymällä kaasumaisista yhdisteistä. Toinen hiukkaspopulaatio havaittiin massakokojakauman kokoluokassa 0,1–1 µm. Tässä hiukkaspopulaatiossa on usein jo pidempään ilmassa viettäneitä hiukkasia, jotka ovat kasvaneet suurimmiksi pienempien hiukkasten tarttuessa toisiinsa. Kolmas populaatio niin sanottuja karkeita hiukkasia havaittiin suurimassa massajakauman koossa (noin 10 µm tai yli). Tällaiset hiukkaset ovat usein syntyneet jonkin mekaanisen työstöprosessin seurauksena, jollaisiin esimerkiksi teräsaihion valssaus kuuluu. Tätä suurikokoisinta pölyä havaittiin kokojakaumassa massallisesti eniten kuten myös keräävien mittausmenetelmien tulokset osoittivat: hengittyvän pölyn massapitoisuus oli huomattavasti suurempi kuin alveolijakeisen pölyn.

Nämä havainnot pölyn jaekoosta vahvistavat aiemmin todettua havaintoa sensoriverkon mittausvasteen huonosta korrelaatiosta punnittuihin massapitoisuuksiin. Sensoriverkon optiset pölysensorit ovat herkempiä havaitsemaan juuri pienemmän kokoluokan pölyä, jota kuumavalssaamalla todettiin lukumäärällisesti eniten. Sen sijaan pölysensorit eivät ole herkkiä suuremman kokoluokan pölylle, jota mitattiin massallisesti eniten, mm. keräävillä menetelmillä (hengittyvä pöly). Siten tutkittujen pölysensorien avulla saadaan tietoa pikemminkin alveolijakeen ja muiden pienempien kokojakeiden osalta.

4.1.3 Toimistorakennukset

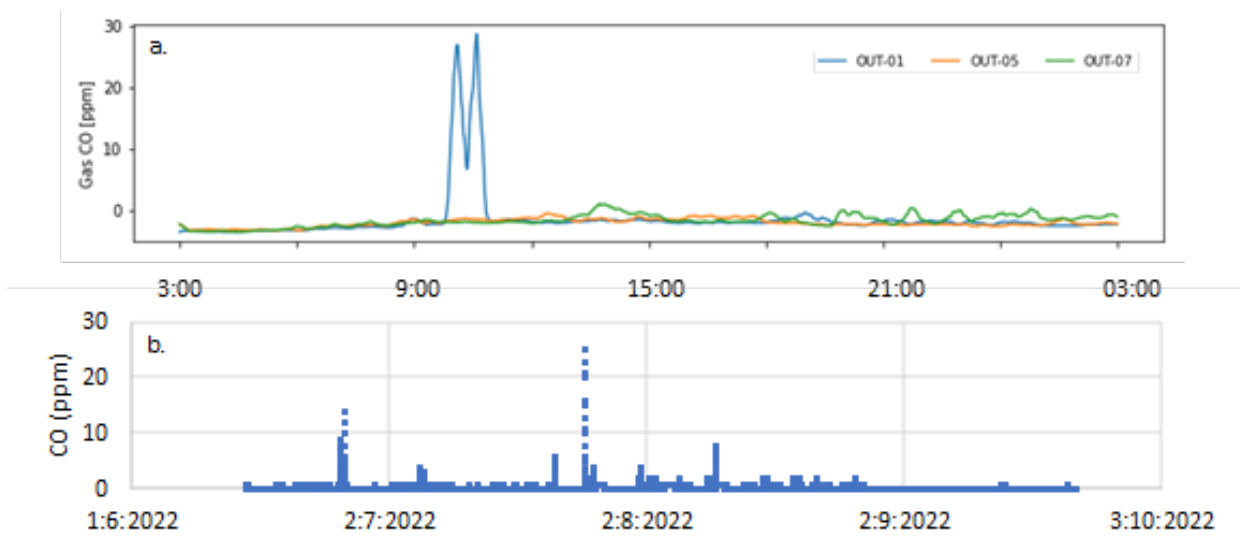
Kolmanteen tutkimuskohteeseen ferrokromisulattojen lähiympäristössä sijainneiden toimistorakennusten läheisyyteen asennettiin kahdeksan tiedonkeruuyksikön sensoriverkko OUT-01–08. Sensoreilla tarkasteltiin erityisesti hiilimonoksidin eli häkäkaasun leviämistä ulkoilmassa tuulen ja ilmavirtausten mukana ferrokromin tuotannosta toimistorakennuksiin. Häkä on määritetty lisääntymisriskille vaaralliseksi altisteeksi ja raskaana olevien koko työpäivän kestävän häkäaltistumisen (8 tunnin aikapainotettu keskiarvo) ei tulisi ylittää pitoisuutta 9 ppm (Frilander et al., 2022, s. 49–50). Siksi häkäkaasun kulkeutumista ilmanvaihdon välityksellä ulkoilmasta toimistojen sisäilmaan tarkasteltiin viidellä toimistorakennusten sisälle asennetulla jatkuvatoimisella työhygieenisellä häkämittalaitteella.

Ferrokromisulatoissa syntyy häkäkaasua metallien pelkistysprosessissa. Häkäkaasua kerätään talteen ja hyödynnetään mahdollisimman tehokkaasti tehtaan muissa prosesseissa. Se osuu häkäkaasusta, jota ei pystytä hyödyntämään, joudutaan turvallisuussyistä soihduttamaan eli hävittämään polttamalla häkäpiipuissa. Prosessihäiriötilanteissa häkäkaasua voi ajoittain vapautua hetkellisesti ilmaan ja levitä ympäristöön, jos liekki ei syty heti tai se pääsee sammumaan. Riippuen vallitsevista sääoloista, kuten tuulen suunnasta ja nopeudesta, häkää voi ajoittain kulkeutua lähialueen toimistorakennusten alueelle lähinnä etelä- ja kaakkoistuulella.

Tällaisia häkäkaasun leviämistapahtumia todettiin ajoittain sekä sensoriverkolla ulkoilmassa että vertailumittauslaitteilla toimistojen sisäilmassa (Kuva 9). Yhteensä noin kahdeksan kuukauden mittausaikana havaittiin viidessä toimistorakennuksessa yhteensä n. 100 tapahtumaa, joissa jonkin rakennuksen sisäilmassa mitattiin yli 2 ppm häkäpitoisuuksia. Tapahtumien kestot vaihtelivat neljästä minuutista 10,5 tuntiin, keskiarvoltaan kesto oli vajaa puolitoista tuntia. Havaitut pitoisuudet tapahtumien aikana olivat keskimäärin pieniä, noin 3 ppm, mutta joidenkin tapahtumien (n=15) keskiarvopitoisuudet ylsivät tasolle 4–12 ppm ja maksimipitoisuudet välille 6–25 ppm. Tapahtumien kestot olivat kuitenkin keskimäärin sen verran lyhyitä, että koko työpäivän aikaiset laskennalliset altistuspitoisuudet olivat näiden tapahtumien aikana vain 0,1–3 ppm luokkaa eli maksimissaan kolmasosa altistumisen viitearvosta raskaana oleville.

Häkäkaasun leviämistapahtumien ja suurimpien toimistorakennuksissa mitattujen pitoisuuksien todettiin johtuvan soihduttamisen yhteydessä olleesta prosessihäiriöstä, jolloin häkäliekki oli päässyt sammumaan. Häkää pääsi leviämään toimistorakennusten alueelle ja rakennuksiin erityisesti etelä-, kaakkois- ja lounaistuulen aikana sekä tuulettomissa tilanteissa, joissa ilman epäpuhtaudet, kuten häkä, jäivät seisomaan päästölähteiden lähelle.

Mittauksilla havaittiin toimistorakennusten välillä eroja ja päästölähteistä kauimpana sijainneessa rakennuksessa todettiin määrällisesti vähemmän tapahtumia. Lisäksi havaitut häkäpitoisuudet olivat keskimäärin (2–3 ppm) ja maksimitasoiltaan (2–7 ppm) pienempiä kuin muissa rakennuksissa. Myös koko työpäivän aikaiset altistumiset jäivät 0–1,3 ppm tasolle johtuen lyhyistä altistumisajoista, siten rakennuksen havaittiin soveltuvan raskaana oleville.



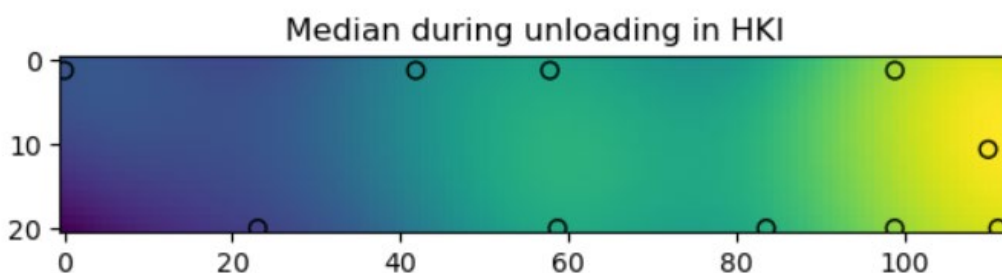
Kuva 9. Hiilimonoksidin eli häkäkaasun (CO) pitoisuudet mitattuna a) sensoriverkon mittapisteessä kolmen toimistorakennuksen katolla ja b) vertailumittauslaitteella yhden toimistorakennuksen sisällä 14.6.-22.9.2022. Suurin häkäpitoisuus (n. 25 ppm) havaittiin 25.7.2022 n.klo 10:00–11:30 sekä sensoriverkolla (OUT-01) toimistorakennuksen katolla ilmanottokanavan vieressä, että vertailumittauslaitteella rakennuksen sisällä toimistotilasta. Samanaikaisesti muissa rakennuksissa ei havaittu häkäpitoisuuden nousua.

4.2 Sensoriverkkoalueen pitoisuus- ja lämpötilakartat

Sensoriverkkojen mittaustulosten avulla laadittiin pöly- ja kaasupitoisuus- sekä lämpötilakarttoja, joilla voidaan tarkastella eri mittauskohteissa vallinneiden olosuhteiden paikallisia eroja.

4.2.1 Laivan autokansi – kaasupitoisuuskartta

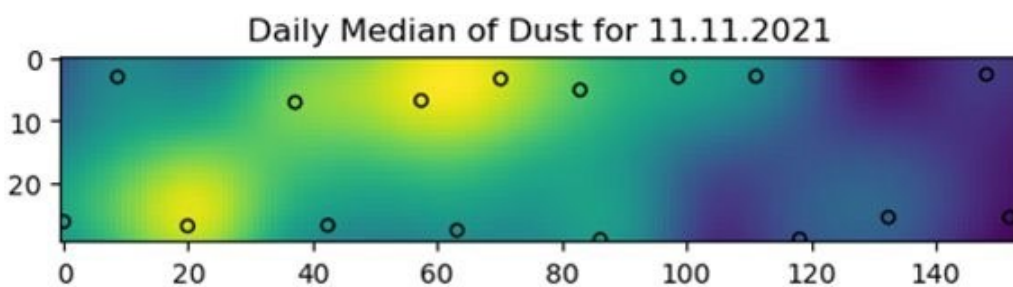
Laivan autokannelta laadittiin hankkeessa kehitetyillä laskenta-algoritmeilla kaasupitoisuuskarttoja. Esimerkiksi tilanteesta, jossa laivan autokantta purettiin laivan perästä, luotiin kuvan 10 mukainen pitoisuuskartta. Se osoittaa selvästi, että kaasumaisten epäpuhtauksien (pääasiassa typpidioksidi) suurin pitoisuus on laivan keulassa (kuvassa oikealla) lähellä ilmanvaihdon poistoventtiilejä, joiden kautta imurit imevät poistoilman. Pitoisuus on matalin laivan perässä (kuvassa vasemmalla), jossa raikas ulkoilma aiheuttaa mäntämäisen virtauskentän koko autokannen pituudelle. Ilman virtaus tehostuu autokaistan tyhjetessä.



Kuva 10. Laivan autokannen kaasupitoisuuskartta purkamisen aikana. Kirkas keltainen kuvaa suuntaa antavasti suurta ja tumma sininen pientä kaasupitoisuutta. Akseleiden lukuarvot ovat etäisyyksiä metreinä.

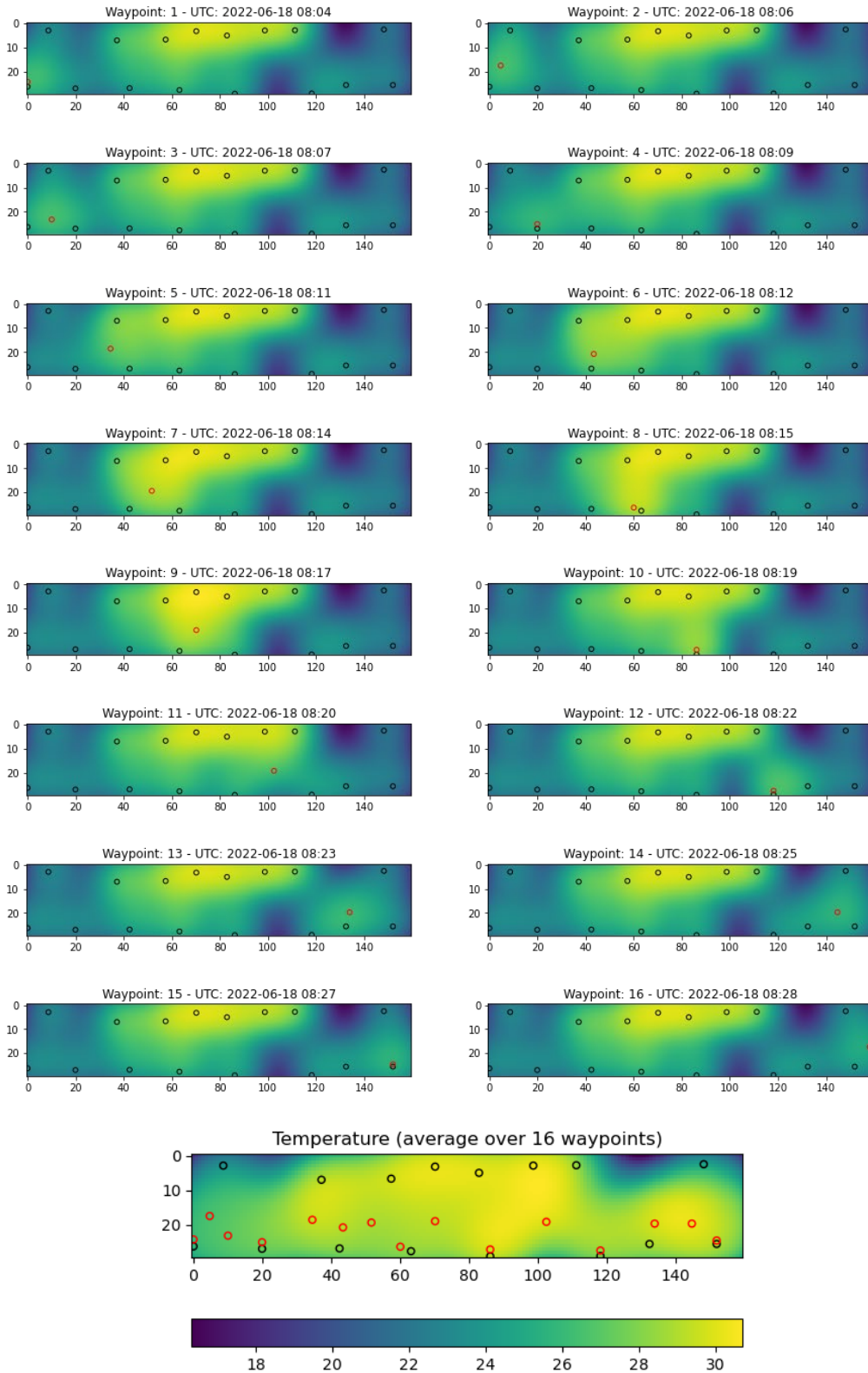
4.2.2 Terästehtaan kuumavalssaushalli – pölypitoisuus- ja lämpötilakartat

Myös kuumavalssaushallista laadittiin kehitetyillä laskenta-algoritmeilla pölypitoisuuskarttoja. Esimerkiksi kuvassa 11 on esitetty yhden päivän mittaustulosten perusteella luotu kartta, josta havaitaan alueellisia eroja kuumavalssaushallin pölypitoisuudessa. Nämä alueelliset erot sensoreiden mittauspisteiden välillä (mustat ympyrät) olivat suhteellisesti jokseenkin samankaltaisia sekä sensoriverkon pitoisuuskartoissa että työhygieenisiiä vertailumittaustuloksia tarkasteltaessa. Huomattavaa kuitenkin on, että sensoriverkon tulokset eivät kuvaa pitoisuuksien todellisia arvoja.



Kuva 11. Sensorien mittaustuloksen avulla laadittu pölykartta kuumavalssaushallista. Pölykartta on yhden päivän mediaanitulos perustuen kuvassa 7 esitettyyn dataan. Perinteisillä työhygieenisillä mittausten menetelmillä nähtiin jokseenkin vastaavia pitoisuseroja sensoriverkon mittauspisteillä (mustat ympyrät). Kirkas keltainen kuvaa suuntaa antavasti suurta ja tumma sininen pientä pitoisuutta. Akseleiden lukuarvot ovat etäisyyksiä metreinä.

Pölypitoisuuskarttojen lisäksi kuumavalssaushallista laadittiin vaiheittainen kuvasarja sensoriverkon lämpötilan muutoksesta (Kuva 12). Kyseistä sensoriverkon tulosta täydennettiin robottiauton mittaustuloksella alueilla, jotka sijaitsivat kiinteiden sensoreiden välissä, ja siten niistä ei ollut aiemmin tarkkaa mittaustulosta. Kuvassa havaitaan lämpötilaerojen tasoittuvan täydentävällä mittaustuloksella.



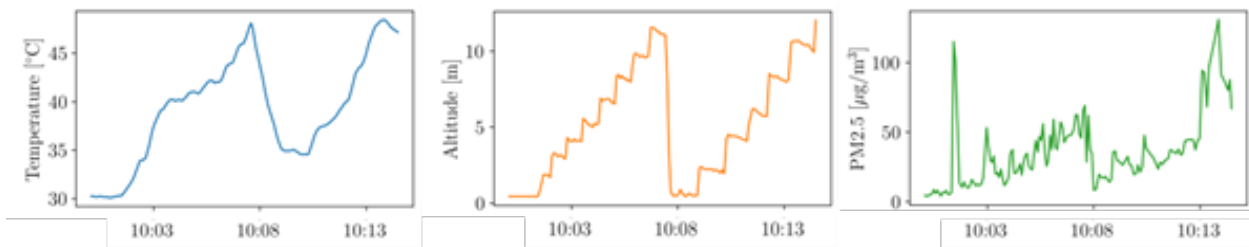
Kuva 12. Sensoriverkon lämpötilaa (°C) kuvaava aluekartta (mustat pisteet) yhdistettynä robottiautolla tehtyihin mittauksiin (punaiset pisteet). Robottiauton mittauspisteet täydentävät kiinteiden sensoreiden väliin jäävää aluetta, kuten alimmasta yhdistelmäkuvausta nähdään. Kirkas keltainen kuvaa suuntaa antavasti suurta ja tumma sininen pientä pitoisuutta. Akseleiden lukuarvot ovat etäisyyksiä metreinä.

4.3 Liikkuvat mittausyksiköt – droni ja robottiauto

Tutkimushankkeessa täydennettiin kiinteään sensoriverkon mittaustulosta liikkuvilla mittausyksiköillä dronilla ja robottiautolla. Robottiautolla ajettiin kuumavalssaushallin lattiatasossa kiinteiden mittapisteiden välialueella, joten sillä voitiin luoda parempaa vaakasuuntaista kokonaiskuvaava hallin lämpötila- ja pölypitoisuusprofiileista, kuten esimerkiksi kuvasta 12 havaittiin. Lisäksi mittauksia tehtiin droni-lennoilla, joilla saatiin kuvaa pystysuuntaisista profiileista mittapisteiden HRM-01 ja HRM-02 lähetyvillä, katso kuva 13.

Dronilla lennettiin kaksi pystysuuntaista lentoa lattiantasosta vaiheittain noin 12 metrin korkeuteen, mistä saatiin tietoa tehdashallin lämpötila- ja pölypitoisuusprofiileista. Ensimmäisellä lennolla havaittiin lämpötilan kasvavan lattiatasosta (30°C) kattotasoa kohden (47°C). Tuotantoprosessissa syntyvä lämpö siis nousee lattiatasolta kohti kattoa kuten voidaan olettaa. Sama ilmiö havaitaan myös pölypitoisuudessa. Pitoisuus kasvaa lattiatasosta kattoa kohden, suurimmat pitoisuudet havaitaan dronin maksimilentokorkeudella yhtä poikkeusta lukuun ottamatta. Tämä yksittäinen suurempi pitoisuuspiikki n. klo 10:01 dronin juuri noustessa ilmaan saattaa johtua samanaikaisesti tapahtuvasta teräsaihion valssauksesta, sillä dronilla lennettiin tuolloin aivan prosessin vieressä.

Myös seuraavalla dronin lennolla klo 10:08 alkaen havaitaan pölypitoisuuden kasvu lentokorkeuden funktiona. Lisäksi havaitaan äkillisempi pitoisuuden nousu klo 10:13 alkaen, jolloin teräsaihion valssaus oli käynnissä dronin alapuolella. Huomataankin, että yksittäiset prosessin vaiheet kuten teräsaihoiden liikkeet ja niiden valssaus tuottavat pölyä tehdashallin ilmaan, joka havaitaan suurempina pölypitoisuuksina erityisesti korkealla lattiatasoon nähden. Pöly siis nousee tehdashallissa lämpimien ilmapirtausten mukana kohti kattoa.

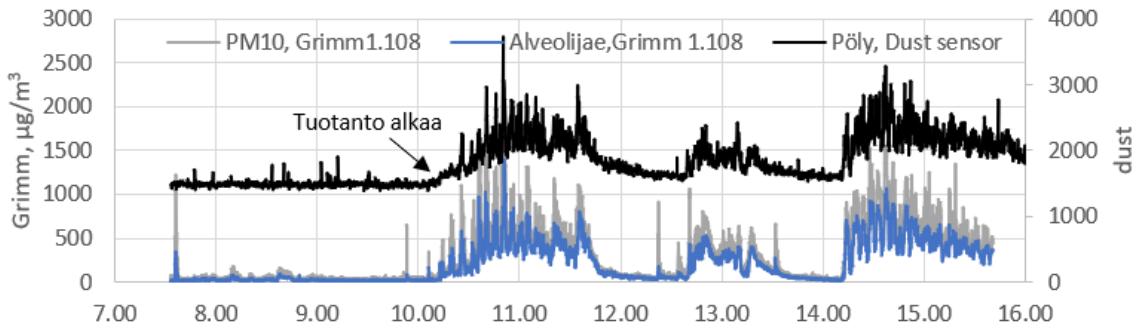


Kuva 13. Droni-mittauksella havaittiin yhteneväisyyttä dronin mittaamassa lämpötilassa (temperature), lentokorkeudessa (altitude) ja pölypitoisuudessa (PM2.5).

4.4 Työntekijäkohtaisten altistumismittausten ja sensoriverkon tulosten vertailu

Tutkimuksen kolmessa eri kohteessa työntekijät viettivät vaihtelevia aikoja alueella, jonne sensoriverkko oli asennettu. Ensimmäisessä kohteessa laivan autokannella tyypillistä oli, että työntekijöiden työtehtävät sijoittuivat tutkittavan sensoriverkon alueelle sekä osittain sen ulkopuolelle. Työn kesto sensoriverkon alueella vaihteli noin välillä 1–3 tuntia, joka rajautui työtehtäviltä selvästi autokannen lastaukseen ja purkuun laivan ollessa satamassa. Toisen tutkimuskohteen eli kuumavalssaamon työntekijät työskentelivät tuotantotilassa, jonne sensoriverkko oli asennettu, päivittäin hyvinkin vaihtelevia aikoja, minuuteista jopa koko työpäivään. Tuotantotilassa tehtäviä töitä olivat prosessin toimintaan ja koneiden huoltoon liittyvät välttämättömät tehtävät, erityisesti seisokkipäivinä tuotantohallissa oli toimintaa sensoriverkon alueella. Tuotannon ollessa käynnissä työntekijät työskentelivät pääosin sensoriverkon alueen ulkopuolella, kuten valvomoissa ja muissa tehdashalleissa, mutta tekivät mm. tarkastuskierroksia kuumavalssaushalliin. Kolmannessa kohteessa työntekijät olivat pääosin koko työpäivän toimistorakennuksissa, mutta epäpuhtauden lähde oli ulkoilma toimistotilojen ulkopuolella.

Laivan autokannella havaittiin kohtalaisen hyviä vastaavuuksia sensoriverkon pölypitoisuuksien mittaustulosten muutoksien ja työntekijöiden hengitysvyöhykkeeltä suoraan osoittavilla mittalaitteilla määritettyjen pitoisuuksien välillä (esim. kuva 14). Myös kuumavalssaamossa työntekijän ollessa sensoriverkon alueella voitiin hengitysvyöhykkeeltä määritetty pölytulos ja sensoriverkon mittaustulosten suuntaa antavasti yhdistää. Esimerkiksi työntekijän altistumistasoa havaittiin vaihtelevan runsaammin hänen liikkua matalan pölypitoisuuden omaavalla alueella, jossa sensoriverkolla havaittiin huomattavasti suurempi ajallinen pitoisuusvaihtelu.



Kuva 14. Pölypitoisuuden ajallinen vaihtelu laivan autokannella kiinteästä sensoriverkon mittapisteestä TAL-01 pölysensorilla (Dust, musta) ja työhygieenisellä pölymittalaitteella (Grimm, harmaa ja sininen). Kuvaajista erottuvat korkeampina pölypitoisuuksina autokannen purku aamupäivällä sekä lastaus iltapäivällä. Kaikki mittalaitteet havaitsivat pitoisuusnousuja samoina ajankohtina. Työntekijämittaus eroaa hieman kiinteän pisteen mittauksesta, sillä työntekijä liikkuu autokannella tarvittaessa eri paikkoihin liikenteen ja konttien lastauksen mukaan.

Suurimmat haasteet sensoriverkon mittaustuloksen yhdistämisessä työntekijäaltistumiseen liittyivät etenkin kuumavalssaamossa työntekijän sijainnin paikantamiseen suhteessa sensoriverkkoon. Kun laivan autokannella työntekijät olivat sensoriverkon alueella koko altistavan työvaiheen ajan, kuumavalssaamossa työntekijöiden sijainti vaihteli paljon laajemmin. Tässä syystä laivan autokannella sensoriverkosta saatu tieto kuvasi paremmin työntekijöiden altistumista, vaikkakaan raja-arvoihin verrattavissa olevia pölyn ja muiden altisteiden massapitoisuuksia ei sensoriverkolla voitu määrittää.

Sen sijaan työhygieenisillä mittaustuloksilla saatiin tietoa todellisista altistumistasoista, jotka on laivan autokannen ja kuumavalssaamon osalta esitetty taulukossa 2. Laivan autokannen työntekijöiden kahdeksan tunnin altistuminen standardin mukaisen tarkastelun perusteella oli alle lakisäätöjen raja-arvojen. Mittaustuloksista laskennallisesti arvioidut dieselpakokaasujen altistustasot olivat korkeintaan 12 % sitovasta raja-arvosta (VNa 1267/2019). Mitatut pitoisuudet alittivat myös Työterveyslaitoksen ehdottaman dieselpakokaasujen tavoitetasoa (Työterveyslaitos, 2015), yhtä mittaustulosta lukuun ottamatta. Työntekijöiden altistuminen autokannella aiheutui pääsääntöisesti lastaukseen ja purkuun käytettyjen kuormauskoneiden ja dieseltrukkien pakokaasupäästöistä sekä erityisesti lastia purettaessa rekkojen kylmäkäynnistyksen jälkeisistä tyhjäkäynnin päästöistä. Siten altistumisen edelleen vähentämiseksi ehdotettiin vaikuttamista juuri näiden koneiden päästöihin, esimerkiksi säännöllisellä huollolla, päästömittauksilla, jälkiasennettavilla pakokaasun käsittelylaitteilla (retrofittaus, Järvinen et al., 2019), hiukkassuodattimilla tai vähäpäästöisemmän teknologian valinnalla.

Lisäksi mahdollinen katupölylle altistuminen (hengittyvä ja alveolijakeinen pöly) oli autokannella vähäistä mittausten aikaisissa olosuhteissa. Laskennallisesti arvioidut koko työpäivän aikaiset altistustasot, olivat korkeintaan 4 % epäorgaanisen pölyn HTP-arvosta. Pölypitoisuudet olivat myös alle Työterveyslaitoksen

ehdottaman tavoitetason (Työterveyslaitos, 2016). Katupölyn osalta vesiruiskutuksen käyttö todettiin mittauksilla tehokkaaksi menetelmäksi pölyn hallitsemiseksi.

Taulukko 2. Keräävillä mittausmenetelmillä määritetyt altisteiden työtehtävänäikaiset keskiarvopitoisuudet työntekijöiden hengitysvyöhykkeellä kuumavalssaamalla ja laivan autokannella.

| Altiste | Kuumavalssaamo Pitoisuus (mg/m³) n=45 | Laivan autokansi Pitoisuus (mg/m³) n=17 | Työhygieeninen vertailuarvo (mg/m³) (8h keskipitoisuus) |
|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Pöly, alveolijae | <0,1–0,6 | <0,1–0,3 | - |
| Pöly, hengittyvä jae | <0,07–4,7 | <0,3–1,1 | 10* |
| Nikkeliyhdisteet, alveolijae | <0,0001–0,01 | - | 0,01* |
| Nikkeliyhdisteet, hengittyvä jae | <0,0004–0,08 | - | 0,05* |
| Kromi(II, III)-yhdisteet, hengittyvä jae | <0,0002–0,1 | - | 0,5* |
| Kromi(VI)-yhdisteet, hengittyvä jae | <0,0001–0,0003 | - | 0,005* |
| Dieselnoki (alkuainehiili), alveolijae | - | 0,01–0,03 | 0,05** |
| Typpidioksidi | - | 0,05–0,11 | 0,96 (0,5 ppm)* |

* HTP8h-arvo (HTP-arvot 2020)

** sitova raja-arvo (VNa 1267/2019)

Kuumavalssaamon työntekijämittauksissa todettiin hengittyvän pölyjakeen osalta määrällisesti eniten kaksi- ja kolmiarvoista kromia. Yksittäisinä mittauspäivinä hengittyvästä pölystä määritetty nikkelpitoisuus ylittyi kahdessa työtehtävässä, sekä yhtenä päivänä alveolijakeinen nikkeli oli HTP-tasolla yhdessä työtehtävässä. Työtehtäviin sisältyi tällöin työtä kuumavalssaushallissa tuotannon ollessa käynnissä, mutta myös yhtenä seisokkipäivänä havaittiin HTP-arvon ylitys. Kaikissa muissa työtehtävissä mittaustulokset noudattivat raja-arvoja standardin (SFS-EN 689:2018 + AC:2019:en) mukaisen tulosten tarkastelun perusteella.

5 Pohdinta

Tutkimustulokset antavat viitteitä siitä, että edullisia sensoreita voidaan hyödyntää sensoriverkkojen kokoonpanoissa ja niiden antamaa tietoa käyttää edelleen työpaikkakohtaisten pitoisuuskarttojen laadinnassa. Karttojen avulla voidaan visualisoida ilman epäpuhtauksien tai esim. lämpötilan ajallista ja paikallista vaihtelua. Liikuteltavilla robottiaivusteisilla laitteilla eli robottiautolla ja dronella pystyttiin täydentämään sensoriverkolla saatua kuvaa epäpuhtauksien ja lämpötilan jakautumisesta tehdashallissa vaaka- ja pystysuunnassa.

Sensoriverkon käyttö pitoisuuskarttojen laadinnassa vaatii kuitenkin jatkokehittämistä sensorien likaantumisen, sovituksen ja kalibroinnin osalta. Mitattavana altisteena varsinkin pöly on haastava kalibroinnin suhteen useasta tekijästä johtuen, kuten esim. pölyn hiukkaskokoluokasta, massasta ja muodosta (Sousan et al., 2016; Li ja Biswas, 2017; Cauda, 2021). Yksittäisten edullisten pölysensorien toteamisrajat eroavat toisistaan, mikä vaatii sensoreiden sovituksia jo sensoriyksikössä. Kaasusensoreissa tulosten tulkintaa vaikeuttaa sensorien ristikkäisherkyys useille yhdisteille.

Samoin kuin yllä manituissa kirjallisuuslähteissä tässäkin tutkimuksessa havaittiin, että punnitsemalla määritetyt pölyn massapitoisuudet korreloivat huonosti sensoriverkon tulosten kanssa. Sen sijaan yhteys suoraan osoittavan pölymittalaitteen (Grimm) ja sensoriverkon vasteen välillä löytyi. Optisten mittalaitteiden tulokset soveltuvat muutosten todentamiseen, mutta mittalaitteiden kalibroinnit, mittaalueet sekä herkkyydet vaihtelevat, eikä tuloksia voi siten verrata työhygieenisiin raja-arvoihin, jotka useimmiten on annettu hengittävälle pölylle tai pölyn alveolijakeelle (SFS-EN 481:1994).

Sensorien likaantumisen takia sensoriverkkojen käyttö edellyttää pohjatason määrittämistä useasti pitkien mittausjaksojen aikana, jotta mittausulos pysyy riittävän vertailukelpoisena. Sopivan puhdistusvälin määrittäminen puolestaan riippuu ympäröivistä olosuhteista; pölyisempi tai muuten likaisempi ympäristö vaatii tiheimmän puhdistusvälin.

Sensoriverkolla saadaan pitkän aikavälin mittausdataa useita kertoja minuutissa. Tällaisen mittausulosmäärän käsittely vaatii hyvän suunnitelman ja laskenta-algoritmin käsittelyä varten. Algoritmin kehitystyö jatkuu edelleen. Jotta tulokset olisivat hyödynnettävissä myös tavanomaisella työpaikalla, on myös laadittava suunnitelma mm. mittaus tiedon (pitoisuuskartan) päivittämisen taajuudesta sekä pitoisuustiedon käyttökohteista.

Sensoriverkon avulla laaditun pitoisuuskartan ja työhygieenisten mittaus tulosten välillä oli havaittavissa samankaltaisuuksia eli esim. suurimmat pitoisuudet todettiin yleensä samoilla alueilla. Sekä kuumavalssaamalla että laivalla pitoisuuskarttojen arviointia hankaloitti mittauspisteiden välisten pitoisuuserojen pienuus sensorien havaitseman pölyn kokoluokan mittaalueella. Sensoriverkkojen tarkka kalibrointi vertailumittaus tulosten avulla on vielä kesken, ja myös pitoisuus- ja lämpötilamalleja tuottavien algoritmien kehittäminen jatkuu edelleen. Näin ollen pitkälle meneviä johtopäätöksiä ei voida tehdä vielä näiden tulosten perusteella.

Hankkeessa kehitetyillä laskenta-algoritmeilla pystyttiin luomaan kaksidimensionaalisia pitoisuuskarttoja. Kolmedimensionaalisten karttojen laadinta on mahdollista, mutta se ei tässä tutkimuksessa onnistunut laiterikon takia.

Mittauskampanjoiden aikana pystyttiin kuumavalssaamossa tekemään perinteisiä työhygieenisiä mittauksia sekä tuotantotilanteessa että seisokin aikana. Sensoriverkolla havaittiin lämpötilan ja pölypitoisuuden muutoksella yhteys altistavaan tapahtumaan. Tämä antaa viitteen siitä, että olosuhdetta ja myös mittaus tulosten edustavuutta voitaisiin joissakin työympäristöissä arvioida myös esim. yksinkertaisen lämpötilamittauksen avulla.

Sensoriverkoilla saadaan mittaustulosta pitkältä aikaväliltä, mikä on arvokas tieto mittausstandardin (SFS-EN 689:2018 + AC:2019:en) mukaisen työntekijöiden altistumisen arvioinnin kannalta. Työntekijöiden altistumisen arvioinnissa hengittävän pölyjakeen kokoluokka on keskeinen, sillä useimmille hiukkasmaisille ilman epäpuhtauksille työhygieeniset raja-arvot on asetettu hengittävälle pölyjakeelle (SFS-EN 481:1994). Vaikka sensoriverkolla saatiin hyvä korrelaatio herkemman optisen vertailumittalaitteen (Grimm) kanssa, jäi tarkka hiukkaskokoalue tuloksissa epäselväksi. Tämä vaikeuttaa tuloksen hyödyntämistä altistumisen arvioinnissa, sillä lakisääteiset vertailuarvot (HTP-arvot 2020, VNa 1267/2019) on annettu tietyn kokojakeen spesifeille aineille, esimerkiksi pölyn alveolijakeen sisältämille metalleille tai dieselnoelle alkuainehiilenä määritettynä. Riittävän tarkka pölyn kokoluokan puuttuminen vaikeuttaa hankkeessa tuotettujen pitoisuuskarttojen hyödyntämistä altistumisen arvioinnissa. Lisäksi pölyaltistumisen kannalta merkittävät muutokset voivat tapahtua suuremmassa pölyn kokoluokassa, jota sensoreilla ei pystytä havainnoimaan. Tämä tulee ottaa huomioon pitoisuuskarttojen tarkastelussa. Tutkitut edulliset sensorit ovat herkempiä pienempien pölyjakeiden osalta sekä tämän tutkimuksen että kirjallisuuden (Cauda, 2021) perusteella. Siten tulevat sovellukset voisi kohdentaa juuri pölyn alveolijakeen mittaukseen.

Sensoriverkkoa voidaan soveltaa niin sanottujen pitoisuuden "hot-spottien" eli suurimpien paikallisten pitoisuusalueiden löytämiseen. Tällöin työntekijän altistumista voidaan vähentää esim. lyhentämällä "hot-spot" alueilla työskentelyn aikaa sekä kohdentamalla/lisäämällä ilmanvaihtoa tai muita epäpuhtauspitoisuuksia vähentäviä ratkaisuja näillä alueilla. Lisäksi tulee kiinnittää erityistä huomiota työntekijöiden henkilökohtaiseen suojautumiseen mentäessä työskentelemään näille keskimääräistä suuremman pitoisuuden alueille.

Työntekijän sijainnin tarkempi paikallistaminen on myös keskeisessä asemassa kiinteiden sensorien muodostamien pitoisuuskarttojen käytössä. Tässä tutkimuksessa työntekijän sijainti saatiin selville työntekijän työtehtävien ja -aikojen kirjaamisen, aluetta kuvaavan pohjakartan sekä haastattelun perusteella. Näin saatiin kuva työpäivästä, mutta tarkka sijainti ajan suhteen jäi kuitenkin osittain epäselväksi useassa tilanteessa. Myöskään kaikissa tilanteissa työntekijä ei pystynyt työn luonteesta johtuen kirjaamaan työtehtäviä. Mm. laivalla työkirjaus ei onnistunut, jolloin turvauduttiin tutkijoiden tekemiin havaintoihin työntekijän sijainnista sensoriverkkoon nähden. Kirjallisuudesta löytyy viimeaikaisia tutkimuksia työntekijän sijainnin selvittämiseen liittyen (Thomas et al., 2018; Zuidema et al., 2019a, b; 2020)

Sensoriverkko pystyttiin suhteellisen helposti asentamaan suuriin tiloihin laivan autokannelle ja tehdashalliin sekä kesäoloissa ulkoilmaan toimistorakennusten katoille. Autokannen ollessa lastattuna, tilaa oli verrattain niukasti. Pienissä, sokkeloisissa tiloissa sensoriverkon hyödyt voivat olla vähäiset ja sellaisissa tiloissa robottiautoja tai droneja ei voida käyttää, kuten ei voitu autokannellakaan. Myös tuotantoprosessien laatu ja ympäristön olosuhteet voivat asettaa rajoituksia robottivasteisten mittausjärjestelmien käytölle. Uusien mittausmenetelmien hyödyntämisessä työympäristöjen mittauksissa, kuten droonin käytössä, tulee ottaa huomioon myös turvallisuusnäkökulmat vähintäänkin fyysisen ympäristön osalta. Lisäksi miehittämättömällä ilma-aluksella lennätettävien mittausyksiköiden käyttö edellyttää rekisteröitymistä ja on joissain tilanteissa luvanvaraista (EU 2019/947; Traficom OPS M1-29). Vaikuttavia tekijöitä ovat mm. droonin massa, lentokorkeus, kamera. Rekisteröityminen koskee harrastajia ja ammattilaisia edellyttäen siten mittauksen suorittavilta perehtyneisyyttä sekä koetta. Fyysisen ympäristön lisäksi on myös huomioitava mm. valo- ja videokuvaukseen liittyvät näkökulmat.

6 Johtopäätökset ja jatkotutkimustarpeet

Edullisten sensorien kehitys ja hyödyntäminen kaupallisissa sovelluksissa on edennyt, mutta kuitenkin sensoreita on saatavilla verrattain harvoille työhygieenisesti kiinnostaville altisteille. Myös sensoreiden epäspesifisyys, sensorien parametrien suuret toleranssit sekä suppea mittausalueen dynamiikka hankaloittavat mittaustuloksien tulkintaa. Sensoriverkkojen mittaustulokset eivät siten ole suoraan hyödynnettävissä, vaan edellyttävät laajaa kohdeympäristön tutkimusta. Siten myöskään sensoriverkkojen soveltuvuus työntekijän altistumisen seurannassa ei ole yksiselitteistä. Kiinteiden sensoriverkkojen avulla saadaan arvokasta tietoa pitkältä ajalta työympäristön olosuhteista, epäpuhtauspitoisuuksista ja pitoisuuksien vaihtelusta, mutta altistumisen tasoa ei pystytä suoraan arvioimaan johtuen mm. sensoreiden kalibroinnin haasteista ja työntekijöiden työn luonteesta. Myös työntekijän sijainnin selvittäminen kiinteään sensoriverkkoon nähden tuo haastetta altistumisajan osalta. Sen sijaan sensoriverkkojen ja niitä täydentävien liikkuvien mittausyksiköiden avulla saatiin viitteitä ongelmapaikoista, joissa paikalliset pitoisuudet ovat suuria. Tällöin työntekijän altistumista voitaisiin vähentää lyhentämällä juuri näillä korkean epäpuhtauspitoisuuden alueilla käytettävää työaikaa ja kohdentamalla teknisiä torjuntatoimia näille alueille lisäämällä esimerkiksi kohdeilmanvaihtoa. Lisäksi työntekijän ohjeistuksessa voidaan kiinnittää huomiota henkilökohtaiseen suojautumiseen suunniteltaessa työskentelyä tällaisella keskimäärin suuremman pitoisuuden alueella.

Sensoriverkoilla ja robottiaivusteisilla mittausjärjestelmillä saadaan niin paljon mittaustietoa, että sen käsittelyyn tarvitaan laskenta-algoritmeja, joiden kehittämistä tulee jatkaa. Sensoriverkon kalibrointia ja validointia vertailumittauslaitteistolla tulee edelleen kehittää mm. altistumisen arvioinnin tarkentamiseksi. Altistumisen arviointia varten sensoriverkon tulos pitäisi pystyä linkittämään työntekijän sijaintiin, mikä vaatisi työntekijän samanaikaisen paikannustiedon. Jatkossa voisi hyödyntää esim. työntekijöiden kantamia paikantimia. Jatkotutkimuksissa sensoriverkon likaantumiseen liittyvät haasteet täytyy ratkaista. Tarvitaan sensoreiden säännöllistä huoltoa, puhdistusta ja kalibrointia tai halpojen sensoreiden vaihtaminen uusiin tarpeen mukaan. Tätä varten tulee olla suunnitelma. Tarvitaan myös laskenta-algoritmi, jolla saadaan huomioitua/poistettua likaantumisen vaikutus mittaustuloksista.

7 Tulosten hyödyntäminen

Kiinteillä sensoriverkoilla saadaan ilman epäpuhtauspitoisuuksista tietoa pitkältä aikaväliltä, mikä parantaa kokonaiskuvaa työpaikkojen altistumisolosuhteista. Sensoriverkon avulla voidaan siten tukea yksittäisten mittausten tai mittauspäivien tulosta, ja näin tarkentaa työntekijöiden altistumisen arviointia. Kun kiinteiden sensoriverkkoja saadaan kehitettyä riittävän luotettaviksi, voidaan niitä tulevaisuudessa käyttää esimerkiksi riskihallintatoimien suunnittelussa ja kohdentamisessa sekä työntekijöiden opastuksessa.

Työterveyslaitoksella on meneillään tutkimushanke etäluettavien, suoraan osoittavien kaasumittareiden käytöstä altistumisolojen arvioinnissa. Jatkossa voisi olla mielenkiintoista hyödyntää näiden kahden tutkimuksen aineistoja yhdistämällä kiinteän mittausverkon ja suoraan osoittavien, kannettavien mittalaitteiden tuloksia.

Lähteet

- Cauda, E. (2021). Measuring respirable aerosol with real-time optical monitors. NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM), 5th Edition, December 2021, U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health. Viitattu 14.3.2023. Saatavissa: <https://www.cdc.gov/niosh/nmam/pdf/chapter-am.pdf>
- EU 2019/947. Komission täytäntöönpanoasetus (EU) 2019/947, annettu 24 päivänä toukokuuta 2019, säännöistä ja menetelmistä miehittämättömien ilma-alusten käytössä. Saatavissa: http://data.europa.eu/eli/reg_impl/2019/947/2022-04-04
- Frilander, H., Aitto-oja, L., Huuskonen, P., & Santonen, T. (2022). Raskaus ja työn altisteet. Tietoa työstä. Työterveyslaitos. Helsinki. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-261-949-5>
- HTP-arvot 2020: Haitallisiksi tunnetut pitoisuudet. Sosiaali- ja terveysministeriön julkaisu 24/2020. Helsinki 2020. ISBN 978-952-261-949-5 (PDF). Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-00-5658-2>
- Järvinen, A., Timonen, H., Karjalainen, P., Bloss, M., Simonen, P., Saarikoski, S., Kuuluvainen, H., Kalliokoski, J., Dal Maso, M., Niemi, J.V., Keskinen, J. & Rönkkö, T. (2019). Particle emissions of Euro VI, EEV and retrofitted EEV city buses in real traffic. *Environmental Pollution*, 250, 708-716. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.04.033>
- Li, J., & Biswas, P. (2017). Optical characterization studies of a low-cost particle sensor. *Aerosol and Air Quality Research*, 17(7), 1691-1704. Saatavissa: <https://doi.org/10.4209/aaqr.2017.02.0085>
- Safëra. Robot-assisted Environmental Monitoring for Air Quality Assessment in Industrial Scenarios (RASEM). Verkkosivu. Viitattu 14.3.2023. Saatavissa: <https://projects.safera.eu/project/20>
- Spec Sensors. Digital Gas Sensor – Indoor Air Quality. DGS-IAQ 968-040. March 2017. Viitattu 14.3.2023. Saatavissa: <https://www.spec-sensors.com/wp-content/uploads/2017/01/DGS-IAQ-968-040.pdf>
- SFS-EN 481:1994:en. Workplace atmospheres. Size fraction definitions for measurement of airborne particles.
- SFS-EN 689:2018 + AC:2019:en. Workplace exposure. Measurement of exposure by inhalation to chemical agents. Strategy for testing compliance with occupational exposure limit values.
- Sousan, S., Koehler, K., Thomas, G., Park, J. H., Hillman, M., Halterman, A., & Peters, T. M. (2016). Inter-comparison of low-cost sensors for measuring the mass concentration of occupational aerosols. *Aerosol Science and Technology*, 50(5), 462-473. Saatavissa: <https://doi.org/10.1080/02786826.2016.1162901>
- Thomas, G. W., Sousan, S., Tatum, M., Liu, X., Zuidema, C., Fitzpatrick, M., Koehler, K. A. & Peters, T. M. (2018). Low-cost, distributed environmental monitors for factory worker health. *Sensors*, 18(5), 1411. Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/s18051411>
- Traficom. OPS M1-29. UAS-ilmatilavyöhykkeet. TRAFICOM/440737/03.04.00.00/2021. Viitattu 14.3.2023. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/viranomaiset/normi/498001/47919>
- Työterveyslaitos. Dieselpakokaasujen tavoitetasoperustelumuistio. Tavoitetaso TY01-2009. Päivitetty 7.12.2015. Työterveyslaitos. Helsinki. Saatavissa: <https://www.ttl.fi/file-download/download/public/871>
- Työterveyslaitos. Hengittävän ja alveolijakeisen pölyn tavoitetasoperustelumuistio. Tavoitetaso TU-01-2016. Päivitetty 19.8.2016. Työterveyslaitos. Helsinki. Saatavissa: <https://www.ttl.fi/file-download/download/public/873>

- VNa 1267/2019. Valtioneuvoston asetus työhön liittyvän syöpävaaran torjunnasta. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2019/20191267>
- Viitanen, A. K., Uuksulainen, S., Koivisto, A. J., Hämeri, K., & Kauppinen, T. (2017). Workplace measurements of ultrafine particles—a literature review. *Annals of Work Exposures and Health*, 61(7), 749-758. Saatavissa: <https://doi.org/10.1093/annweh/wxx049>
- Waveshare. Dust Sensor. Verkkosivu. Viitattu 14.3.2023. Saatavissa: https://www.waveshare.com/wiki/Dust_Sensor
- Winkler, N. P., Lilienthal, A. J., & Neumann, P. P. (2019). Boosting a low-cost sensor network with mobile high-quality sensors. 36th Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics, Plzen, Czech Republic, September 24-27, 2019. Viitattu 14.3.2023. Saatavissa: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/35331/1/Winkler.pdf>
- Winkler, N. P., Neumann, P. P., Säämänen, A., Schaffernicht, E., & Lilienthal, A. J. (2020). High-quality meets low-cost: Approaches for hybrid-mobility sensor networks. *Materials Today: Proceedings*, 32, 250-253. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.799>.
- Winkler, N. P., Neumann, P. P., Kohlhoff, H., Erdmann, J., Schaffernicht, E., & Lilienthal, A. (2021a). Development of a low-cost sensing node with active ventilation fan for air pollution monitoring. SMSI 2021 Conference: Sensor and Measurement Science International, (Digital conference), May 3-6, 2021 (pp. 260-261). Saatavissa: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:oru:diva-96666>
- Winkler, N. P., Neumann, P. P., Schaffernicht, E., & Lilienthal, A. J. (2021b, October). Using redundancy in a sensor network to compensate sensor failures. 2021 IEEE Sensors (pp. 1-4). IEEE. Saatavissa: <https://doi.org/10.1109/SENSORS47087.2021.9639479>
- Winkler, N. P., Matsukura, H., Neumann, P. P., Schaffernicht, E., Ishida, H., & Lilienthal, A. J. (2022a, May). Super-resolution for gas distribution mapping: convolutional encoder-decoder network. 2022 IEEE International Symposium on Olfaction and Electronic Nose (ISOEN) (pp. 1-3). IEEE. Saatavissa: <https://doi.org/10.1109/ISOEN54820.2022.9789555>
- Winkler, N. P., Neumann, P. P., Kohlhoff, H., Säämänen, A., Kangas, A., Poikkimäki, M., Schaffernicht, E., & Lilienthal, A. J. (2022b). RASEM – Robot-assisted Environmental Monitoring for Air Quality Assessment in Industrial Scenarios. 6th SAFERA Symposium - Safety in the new economy and energy transition, Rome, Italy, May 19-20, 2022. Viitattu 14.3.2023. Saatavissa: <https://projects.safera.eu/project/20#collapse1>
- Winkler, N. P., Neumann, P. P., Schaffernicht, E., Lilienthal, A. J., Poikkimäki, M., Kangas, A., & Säämänen, A. (2022c). Gather Dust and Get Dusted: Long-Term Drift and Cleaning of Sharp GP2Y1010AU0F Dust Sensor in a Steel Factory. 38th Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics, Poros Island, Greece, September 20-23, 2022. Viitattu 14.3.2023. Saatavissa: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1720220/FULLTEXT01.pdf>
- Zuidema, C., Sousan, S., Stebounova, L. V., Gray, A., Liu, X., Tatum, M., Stroh, O., Thomas, G., Peters, T. & Koehler, K. (2019a). Mapping occupational hazards with a multi-sensor network in a heavy-vehicle manufacturing facility. *Annals of work exposures and health*, 63(3), 280-293. Saatavissa: <https://doi.org/10.1093/annweh/wxy111>
- Zuidema, C., Stebounova, L. V., Sousan, S., Thomas, G., Koehler, K., & Peters, T. M. (2019b). Sources of error and variability in particulate matter sensor network measurements. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 16(8), 564-574. Saatavissa: <https://doi.org/10.1080/15459624.2019.1628965>

Zuidema, C., Stebounova, L. V., Sousan, S., Gray, A., Stroh, O., Thomas, G., Peters, T. & Koehler, K. (2020). Estimating personal exposures from a multi-hazard sensor network. *Journal of exposure science & environmental epidemiology*, 30(6), 1013-1022. Saatavissa: <https://doi.org/10.1038/s41370-019-0146-1>